

Remerciement

On tient à remercier en premier lieu ALLAH, le tout puissant de nous donner courage, santé et patience pour achever ce travail (ELHAMDOULILLAH).

On exprime nos remerciements à Mme Boudaoud. S, qui nous a fait l'honneur d'être notre promotrice. Nous la remercions profondément pour son encouragement continue et sa disponibilité, ses précieux nous aides et conseils.

Notre gratitude s'adresse également aux membres du jury, que nous remercions chaleureusement pour l'honneur de leur présence et de leur évaluation de notre projet.

Nos remerciements sont aussi adressés à toutes les personnes qui nous ont aidés à réaliser ce modeste travail.

En fin, nous ne pouvons achever ce mémoire sans exprime notre gratitude à tous les enseignants de la spécialité agroalimentaire et contrôle de qualité, pour tout le savoir qu'ils nous ont donné.

Dédicaces

Je dédie ce travail ;

*À mes chers parents pour leur patience, leur amour, leur soutien et leur
Encouragement sans faille tout au long de ce parcours académique.*

À mes chères grands-mères

À mes frères

À ma sœur

À mes oncles

À mes tantes

À mon binôme,

À mes amis

À tous mes enseignants

Et à tous ceux qui ont cru en moi, même quand j'avais des doutes.

Merci de tout cœur.

Khaled

Dédicace

Je dédie ce travail :

À Mes chers parents,

Je les remercie pour leurs sacrifices, leurs patiences, leur soutien, l'aide et les encouragements qui m'ont apporté durant toutes ces années d'étude sans eux je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

À Mes deux frères, Sofiane et Massinissa

Merci pour votre soutien, vos encouragements sincères et votre présence

Constante, même dans les moments les plus exigeants.

À l'ensemble de ma famille,

À tous mes amis,

À ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin,

À mon binôme.

Nabil

Liste des abréviations

EAG : Equivalent d'acide gallique.

MS : matière sèche.

PH : Potentiel hydrogène.

°C : Degré Celsius.

m : mètre.

cm : Centimètre.

mm : Millimètre.

L : Litre.

mL : Millilitre.

µL : Microlitre.

µg: Microgramme.

g : Gramme.

Kg : Kilogramme.

% : Pourcentage.

NaOH : Hydroxyde de sodium.

LBG : Gomme de caroube purifiée (Locust Bean Gum).

FFC : cacao de fine saveur (Fine Flavour Cocoa).

KJ: Kilojoule.

Kcal: kilocalories.

EAGC : Extrait aqueux de gousses de caroube.

LDL : lipoprotéines de basse densité.

Inc : Incorporation

°B : Degré Brix.

Liste des figures

Partie 01 : Étude bibliographique

Figure 1. Les grands groupes de <i>Theobroma cacao</i> L.....	05
Figure 2. Aspect de la plante du cacaoyer <i>Theobroma cacao</i> L.....	06
Figure 3. Les fruits et les fleurs de cacao.....	07
Figure 4. Schématisation d'une cabosse de cacao avec sa composition.....	07
Figure 5. Caroubier <i>Ceratonia Siliqua</i> L.....	13
Figure 6. Les feuilles de caroubier <i>Ceratonia Siliqua</i> L.....	13
Figure 7. Les fleurs de caroubier <i>ceratonia siliqua</i> L.....	14
Figure 8. Les fruits et les graine de caroubier <i>ceratonia siliqua</i> L.....	15
Figure 9. Centre d'origine et distribution du caroubier dans le monde.....	16
Figure 10. Produits du caroubier.....	23
Figure 11. Chocolat à boire Montezuma.....	25
Figure 12. Chocolat noir sous forme de tablettes ou de barres.....	26
Figure 13. Chocolat blanc.....	27
Figure 14. Chocolat au lait.....	28
Figure 15. mode de recolte des gousse de cacao (A : un opérateur récoltant les fruits du cacaoyer à l'aide d'un sécateur, B : à l'aide d'une desgarretadera.....	29
Figure 16. Boxes de fermentation des fèves de cacao.....	29
Figure 17. Séchage des fèves de cacao.....	30
Figure 18. Torréfaction des fèves de cacao.....	31
Figure 19. Le raffinage de chocolat.....	32
Figure 20. Le conchage.....	32
Figure 21. Équipement de tempérage.....	33
Figure 22. Moules prêts pour le remplissage.....	34

Partie 02 : Partie expérimentale

Figure 1. La préparation de la poudre de caroube.....	39
Figure 2. Avant l'incinération et après des différents échantillons.....	41
Figure 3. Mesure de PH à l'aide d'un pH-mètre.....	42
Figure 4. Détermination de l'acidité titrable.....	43
Figure 5. Refractomètre pour mesurer le degré Brix.....	44
Figure 6. Séchage des extraits hydro-alcoolique dans l'étuve.....	45

Figure 7.Apparition de la couleur bleue lors de l'ajout des réactifs	46
Figure 8.Taux de cendre (%) en fonction des différents échantillons	47
Figure 9.Acidité titrable (%) en fonction des différents échantillons	48
Figure 10.Degré Brix (°Bx) en fonction des différents échantillons.....	49
Figure 11.la teneur en polyphénols (mg EqAG/g Matière Sèche) en fonction des différents échantillons.....	50
Figure 12.la teneur de ph en fonction des différents échantillons.....	51
Figure 13.Taux d'humidité (%) en fonction des différents échantillons	53

Liste des tableaux

Partie 01 : Étude bibliographique

Tableau I. Résumé de l'étiquetage nutritionnel des poudres de cacao étudiées, pour 100 g de produit	10
Tableau II. Aliments fonctionnels enrichis en caroube et leur impact sur la qualité du produit	17
Tableau III. Composition de la poudre de caroube (valeur nutritionnelle moyenne pour 100g)	19
Tableau IV. Composition de la poudre de caroube (valeur nutritionnelle moyenne pour 100g)	20
Tableau V. Avantages pour la santé des composés bioactifs présents dans la.....	22
Tableau VI. Teneur typique en macronutriments et en énergie des principaux types de chocolat solide	36
Tableau VII. Teneur en vitamines et minéraux du cacao et du chocolat (en mg/100 g	37
Tableau VIII. Impact sur la santé lié à la consommation de chocolat.....	38

Partie 02 : Partie expérimentale

Tableau I. Pourcentage d'incorporation.....	40
---	----

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Remerciement

Dédicace

Introduction générale : 1

Partie 01 : Étude bibliographique

Chapitre 1 le cacao

I.	Introduction sur le cacao:	3
II.	Origine et culture :.....	3
III.	Description botanique :	5
IV.	Composition chimique et nutritionnelle :.....	8
	1. Composants non volatils qui contribuent à la saveur du cacao :.....	8
	2. Composés volatils contribuant à la saveur du cacao :.....	9
V.	Effets sur la santé :	10
	1. Effets sur les neurones :.....	10
	2. Effets anti tumoraux :	11

Chapitre 2 la caroube

I.	Introduction sur la caroube :	12
II.	Description botanique de <i>Ceratonia siliqua L</i> :	12
	1. L'arbre :	12
	2. Les feuilles :	13
	3. La croissance :.....	13
	4. Les fleurs :.....	14
	5. Fruit et graine :	14
III.	Origine et répartition géographique :	15
IV.	Application alimentaires de la caroube <i>C. Siliqua L</i> :.....	16
V.	Composition chimique et nutritionnelle :	18
VI.	Les bienfaits de la caroube pour la santé :	20
	1. Propriétés antioxydants :	20

2. Propriétés anti-hyperglycémiques :.....	21
3. Propriétés gastro-intestinaux :.....	21
VII. Impact économique :.....	22

Chapitre 3 chocolat

I.Histoire et origine de chocolat :.....	25
II.Types de chocolat :	26
1. Chocolat noir :.....	26
2. Chocolat blanc :.....	27
3. Chocolat au lait :	27
III.Technologie de fabrication de chocolat:.....	28
A. La transformation des fèves de cacao :	28
A.1.La récolte :.....	28
A.2.La fermentation :	29
A.3-Le séchage :.....	29
A.4-La torréfaction.....	30
A.5-Le broyage.....	31
A.6-Le pressage.....	31
B. Le mélange et la formulation :.....	31
C. Le raffinage :.....	31
D. Le conchage :.....	32
E. Le tempérage :	33
F. Le moulage.....	33
G. Emballage, stockage et distribution.....	34
IV.Composition du chocolat :.....	34
1. Composition chimique :	34
2. Compositions nutritionnelles :	35
2.1. Macronutriments :	36
2.2. Vitamines et minéraux:.....	36
V.Effet sur la santé :	37

Partie 02 : Partie expérimentale. Matériel et Méthodes

Objectif de travail :.....	39
I. 1. Récolte et préparation du matériel végétal.....	39
. 2.preparations des incorporations :.....	39

I. 3. Analyses physico-chimiques des incorporations :	40
I. 3.1- Taux d'humidité :	40
I. 3.2- Taux de cendres :	41
I. 3.3- Potentiel d'hydrogène (pH) :	42
I. 3.4- Acidité titrable :	42
I. 3.5- Degré de Brix :	44
I. 3.6- les polyphénols totaux :	44
I.4. Analyses statistiques :	46

II. Résultats et Discussion

II. 1. Taux de cendres	47
II. 2. Acidité titrable	48
II. 3. Degré Brix	49
II. 4. Les polyphénols :	50
II. 5. Potentiel d'hydrogène (pH) :	51
II. 6. Taux d'humidité :	53
Conclusion et perspectives.....	54

Références bibliographiques

Annexe

Résumé

Introduction

Introduction

Le chocolat, produit universellement apprécié, doit sa popularité à ses qualités sensorielles uniques et à ses bienfaits pour la santé, liés notamment à son activité antioxydante, anti-inflammatoire, cardiovasculaire et métabolique. Son histoire remonte aux civilisations mayas et aztèques, avant son introduction en Europe au XVI^e siècle. La composition des fèves de cacao (glucides, protéines, polyphénols et beurre de cacao) joue un rôle essentiel dans la qualité, la saveur et la texture du chocolat. Sa fabrication repose sur plusieurs étapes technologiques clés : fermentation, séchage, torréfaction et broyage, permettant de produire principalement trois catégories : noir, au lait et blanc (Saritaş et al., 2024).

Le cacao (*Theobroma cacao* L.) est majoritairement cultivé en Afrique de l'Ouest, principalement en Côte d'Ivoire et au Ghana, qui assurent à eux deux environ 60 % de la production mondiale. Toutefois, sa transformation s'effectue principalement dans l'Union européenne (40 % en 2014), ainsi qu'en Indonésie, aux États-Unis et au Brésil. Cette ressource constitue une matière première essentielle à l'échelle mondiale et représente l'ingrédient de base dans la fabrication du chocolat (Cinar et al., 2021). Le cacao, en tant qu'ingrédient alimentaire, connaît une popularité croissante dans l'industrie agroalimentaire et de la confiserie à travers le monde. Il se présente sous de nombreuses formes, couleurs et saveurs, et trouve des applications variées. Une poudre de cacao de qualité doit être fluide, stable et homogène en termes de couleur et de goût, tout en présentant une bonne qualité microbiologique et une manipulation aisée pour l'utilisateur. Par ailleurs, diverses propriétés telles que le pH, la finesse, la teneur en matières grasses, la mouillabilité, la solubilité et la dispersibilité caractérisent cette poudre et influencent fortement la qualité du produit final dans lequel elle est incorporée (Joel et al., 2013).

Le caroubier (*Ceratonia siliqua* L.), originaire du bassin méditerranéen, est principalement cultivé dans les régions tempérées et sèches. Sa production mondiale atteint environ 160 000 tonnes par an, avec l'Espagne comme principal pays producteur. Ses fruits se caractérisent par une forte teneur en sucres (48–56 %), une faible teneur en graisses (0,2–0,6 %) et une proportion appréciable de protéines (3–4 %). Ils constituent également une source notable de fibres alimentaires, de polyphénols, de minéraux et de vitamines. Les graines renferment la gomme de caroube (LBG), un polysaccharide utilisé dans l'industrie agroalimentaire pour ses propriétés épaississantes et stabilisantes (Papaefstathiou et al., 2018). Quant à la pulpe, issue de l'extraction des graines, elle est riche en fibres, sucres et composés

bioactifs tels que les polyphénols, reconnus pour leurs effets antidiabétiques, antioxydants et anti-inflammatoires. Ces propriétés lui confèrent un fort potentiel d'utilisation comme ingrédient dans les produits agroalimentaires, notamment sous forme de poudre (Boublenza et al., 2019).

Notre travail consiste à valoriser la poudre de caroube pour l'utiliser comme substituant de cacao dans les préparations alimentaires.

Ainsi, notre travail réalisé au sein du laboratoire de l'université de Mouloud Mammeri faculté des Sciences biologiques et agronomiques a pour objectif d'étudier ses paramètres physicochimiques (humidité, cendres, pH, degré Brix, acidité titrable et teneur en polyphénols) sur la poudre pure de caroube ou mélangée au cacao avec des différentes proportions.

Le présent document est structuré en différentes parties :

- La première partie c'est une synthèse bibliographique sur le sujet étudié.
- La deuxième partie comporte les méthodes d'étude expérimentale du travail ainsi le matériel utilisé.
- La troisième partie c'est les résultats obtenus avec leurs interprétations.

Enfin on termine par une conclusion générale, résumant l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus au cours de ce travail et quelques perspectives.

Partie bibliographique

Chapitre 1 Le cacao

I. Introduction :

Le cacao ne représente pas seulement l'ingrédient principal du chocolat : c'est aussi une culture commerciale essentielle, qui constitue une source de revenus pour plus de six millions de petits exploitants agricoles dans les zones tropicales humides (Olwig et al., 2024).

Issu des fèves du cacaoyer (*Theobroma cacao L.*), un arbre à feuilles persistantes, le cacao est cultivé dans une bande équatoriale située à moins de 20° de latitude. Originaire des régions tropicales d'Amérique, le cacaoyer produit des cabosses qui poussent directement sur le tronc et les branches principales (Aprotosoie et al., 2016).

La demande en cacao et en chocolat ne cesse de croître, en raison de leurs qualités sensorielles uniques, notamment leur texture fondante et leur goût agréable. Par ailleurs, de nombreuses études récentes ont mis en évidence les bienfaits du cacao pour la santé, le positionnant comme un aliment fonctionnel prometteur. La qualité gustative du cacao repose sur des facteurs complexes. À l'état brut, les fèves présentent une forte astringence et une amertume marquée. Ce n'est qu'après des étapes post-récolte cruciales — fermentation, séchage, torréfaction — que se développe le profil aromatique caractéristique du cacao et du chocolat. Ces processus, influencés par le type de cacao, les conditions de culture, la géographie et les méthodes de transformation, génèrent une grande diversité de saveurs (Olwig et al., 2024).

Afin de mieux maîtriser la qualité finale du cacao, il est essentiel de comprendre les interactions entre les composés chimiques impliqués dans sa saveur, leurs propriétés sensorielles, et les mécanismes de leur formation. L'établissement de ces relations constitue un levier clé pour développer des modèles prédictifs de la saveur du cacao (Aprotosoie et al., 2016).

II. Origine et culture

Le cacao (*Theobroma cacao L.*) est une culture tropicale appartenant à la famille des *Malvacées* et au genre *Theobroma*. Il est communément appelé cacao ou chocolat (Baharum et al., 2016). Le genre *Theobroma* comprend vingt-deux (22) espèces, dont *Theobroma cacao L.* est la plus importante et la plus cultivée en raison de la valeur de ses graines (Kongor et al., 2024). Le cacao serait une espèce originaire des forêts tropicales humides des pentes équatoriales orientales des Andes sud-américaines (Caligiani et al., 2016). Le mot « cacao » vient des langues olmèque et maya (Kakaw), et « cacahuatl » est un mot nahuatl (langue

aztèque) dérivé de l'étymologie olmèque/maya. La culture du cacao remonte à 600 après J.-C. dans les basses terres du sud du Yucatan par les Mayas. Selon Purdy et Schmidt (1996), les Mayas cultivaient le cacao depuis 2 000 à 4 000 ans avant l'arrivée des Espagnols. *Theobroma cacao*, son nom botanique officiel actuel, a été nommé en 1737 par le botaniste suédois Carolus Linneaus à partir du mot grec « ambrosia », qui fait référence à l'origine mythique de l'arbre et signifie littéralement « cacao, nourriture des dieux » (Kongor et al., 2024).

À l'échelle mondiale, le cacao (*Theobroma cacao L*) est cultivé sur plus de 11,5 millions d'hectares de terres situées entre 10°N et 10°S de l'équateur, l'Afrique cultivant la majeure partie (7,9 millions d'hectares) de la superficie déclarée et l'Océanie la plus petite partie (0,12 million d'hectares). Le cacao (*Theobroma cacao L*) est un arbre pérenne qui peut atteindre une hauteur de 5 à 15 m dans les régions où les précipitations sont présentes toute l'année, de préférence entre 1 500 et 2 500 mm par an, et où l'humidité est élevée, souvent comprise entre 70 et 100 %. Des précipitations annuelles supérieures à 2 500 mm ont été associées à une augmentation de l'incidence des maladies fongiques telles que la pourriture noire et le dépérissement vasculaire, ainsi qu'à un lessivage important des nutriments du sol (Baharum et al., 2016). Une étude menée au Cameroun a révélé une incidence plus élevée (65 à 70 %) de la pourriture des cabosses due au *Phytophthora* lorsque les précipitations dépassaient 2 200 mm. La culture préfère également des températures comprises entre 18 °C et 32 °C, des conditions de sol variées et une saison sèche ne dépassant pas trois mois. Le cacaoyer produit des fruits, appelés cabosses, le long du tronc et des branches. Les cabosses sont ovales, mesurent entre 12 et 30 cm de long et contiennent environ 30 à 40 graines, également appelées fèves de cacao. Les graines sont également de forme ovale, mesurent environ 2 cm de long et 1 cm de large, et sont enrobées d'une pulpe mucilagineuse sucrée qui représente environ 40 % du poids frais de la fève. Les fèves sont composées d'un embryon et de deux cotylédons (86 à 90 % du poids sec de la graine) (Kongor et al., 2024).

Traditionnellement, le cacao (*Theobroma cacao L*) est classé en quatre (4) grands groupes (figure 1), à savoir Forastero, Criollo et Trinitario et le Nacional, pousse en Équateur et serait originaire de la région amazonienne de ce pays. Ces groupes de cacao diffèrent par leur composition chimique, l'apparence de leurs cabosses et de leurs fèves, leur résistance aux parasites et aux maladies, leurs caractéristiques gustatives et leurs propriétés texturales et organoleptiques. Ces groupes comprennent plusieurs variétés. Le cacao Forastero, une variété plus robuste et à rendement plus élevé, produit des fèves au goût amer qui représentent environ 80 % des fèves de cacao cultivées dans le monde, tandis que le Criollo produit une fève de

meilleure qualité, aromatique et légèrement amère, qui représente moins de 5 % de la production mondiale totale. Le cacao Trinitario, un croisement entre le Forastero et le Criollo, représente environ 15 % de la production mondiale, tandis que le Nacional, quant à lui, est un cacao équatorien rare, représentant environ 2 % de la production mondiale. Le cacao Nacional, qui produit des fèves à l'arôme plus floral et peu amer, a été décimé par une épidémie de maladie végétale qui a ravagé l'Équateur en 1920. Le cacao Forastero est communément appelé « cacao en vrac », tandis que les cacaos Criollo, Trinitario et Nacional sont classés comme « cacao de fine saveur (FFC) » sur le marché mondial du cacao (Kongor et al., 2024).



Figure 1. Les grands groupes de *Théobroma cacao L* (anonyme, 2025)

III. Description botanique

L'arbre tropical *Théobroma cacao L.*, connu sous le nom de cacao, appartient à la famille des *malvacea* ordre des *Malvales*. Dans l'Amérique centrale antique, les Mayas et les Aztèques cultivaient des cacaoyers afin d'utiliser leurs graines pour préparer le « chocolat », la première boisson à base de chocolat. Le cacaoyer (*T. cacao L.*) est un petit arbre tropical et subtropical à feuilles persistantes originaire des forêts tropicales humides néotropicales (Predan et al., 2019).

La hauteur du cacaoyer *Théobroma cacao L.*, peut varier entre 5 et 15 m. Pour pousser correctement, le cacaoyer a besoin d'un climat chaud et humide, avec des températures comprises entre 24 °C et 28 °C et une altitude maximale de 600 m. En raison de leur sensibilité à la lumière et au vent, ils sont généralement cultivés sous ce qu'on appelle des « mères cacao », qui sont essentiellement des cocotiers ou des bananiers (figure 2) (Predan et al., 2019).



Figure 2. Aspect de la plante du cacaoyer *Theobroma cacao L* (De Souza et al., 2018).

Un cacaoyer adulte fleurit tout au long de l'année et peut produire annuellement plus de 100 000 fleurs. Toutefois, à peine 0,1 % d'entre elles aboutissent à la formation de fruits. Les fleurs non pollinisées se détachent dans les 48 heures, tandis que celles qui sont fécondées demeurent fixées au pédoncule et évoluent en fruits. Ces petites fleurs, aux teintes rouges, jaunes ou blanches (Figure 3), sont caractéristiques de l'espèce et conduisent généralement à la production de 20 à 50 cabosses par arbre (De Souza et al., 2018).

Les cabosses mûres, de forme ovoïde rappelant un melon, mesurent en moyenne 15 à 25 cm de long et 7 à 10 cm de large. Immatures, elles présentent généralement une couleur verte qui vire au jaune à maturité. Certaines variétés passent toutefois du violet (teinte rouge vineux) durant leur développement à l'orange lors de la maturation (Figure 4). Le cycle de développement du fruit, de la pollinisation à la maturité, s'étend de 140 à 205 jours, avec une moyenne d'environ 167 jours. L'indice de fructification (nombre de fruits nécessaires pour

obtenir 1 kg de cacao commercial) est généralement compris entre 15 et 31 fruits (De Souza et al., 2018).



Figure 3. Les fleurs et les fruits de cacao (De Souza et al., 2018).

Chaque cabosse renferme entre 35 et 50 fèves, enveloppées d'une pulpe mucilagineuse. Les fèves de cacao, de forme ovale et légèrement aplatie, mesurent environ 2 cm de longueur pour 1 cm de largeur, et présentent un poids moyen d'environ 1 g après séchage. L'embryon est constitué de deux cotylédons charnus (graines) ainsi que d'un germe radriculaire mesurant près de 5 mm de long et 1 mm d'épaisseur (Figure 5) (Fowler & Coutel, 2017).

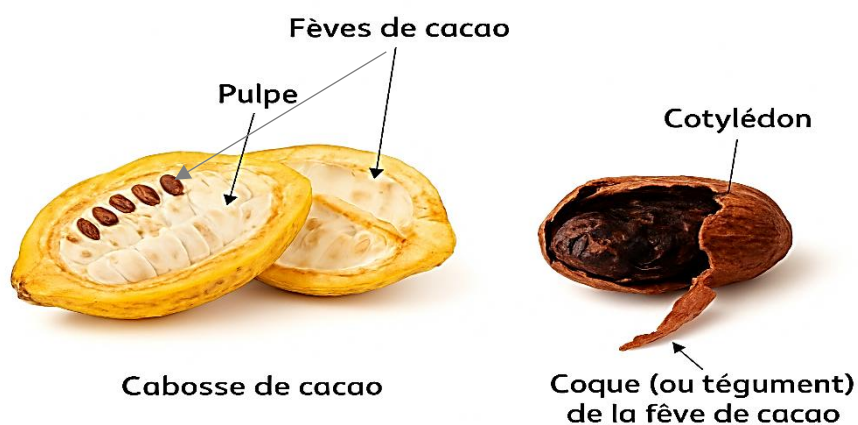


Figure 4. Structure d'une cabosse de cacao avec sa composition (Fowler & Coutel, 2017).

IV. Composition chimique et nutritionnelle

1. Composants non volatils qui contribuent à la saveur du cacao

Les fèves de cacao renferment plusieurs composants chimiques essentiels qui participent à la formation de la saveur du chocolat. Leur teneur varie selon le génotype, les conditions de culture et les procédés de transformation (**Aprotosoie et al., 2016**).

- ✓ Les alcaloïdes, qui représentent environ 4 % des fèves, sont dominés par la théobromine (2 à 3 %), suivie de la caféine (0,2 %) et de la théophylline (en traces). Ces composés sont responsables du goût amer caractéristique du cacao et contribuent à son appétence (**Aprotosoie et al., 2016**).
- ✓ Les polyphénols constituent environ 15 % du poids sec des fèves. Ils comprennent principalement les catéchines, les anthocyanines et les proanthocyanidines, avec aussi des flavones et acides phénoliques en moindre proportion. Ils jouent un rôle important dans les caractéristiques sensorielles (amertume, astringence, notes fruitées et vertes) ainsi que dans les effets bénéfiques sur la santé. Toutefois, leur teneur est fortement réduite par les procédés de fermentation, de séchage, de torréfaction et surtout d'alcalinisation, qui entraînent des pertes pouvant atteindre plus de 90 % (**Aprotosoie et al., 2016**).
- ✓ Les protéines, présentes à hauteur de 10 à 16 % du poids sec, sont principalement constituées d'albumines et de globulines, en particulier la viciline 7S. Lors de la fermentation, la dégradation enzymatique de ces protéines libère des acides aminés et oligopeptides hydrophobes qui deviennent des précurseurs d'arômes. Ces composés participent ensuite aux réactions de Maillard lors de la torréfaction, ce qui génère les arômes caractéristiques du chocolat (**Aprotosoie et al., 2016**).
- ✓ Enfin, les glucides représentent 2 à 4 % de sucres libres (principalement saccharose, glucose et fructose) et environ 12 % de polysaccharides (amidon, pectines, cellulose et mucilage). Dans les fèves fraîches non fermentées, le saccharose prédomine largement. Durant la fermentation, l'invertase le transforme en glucose et fructose, indispensables à la formation de la saveur. Ces sucres réducteurs interagissent avec les acides aminés au cours de la torréfaction par les réactions de Maillard, générant les arômes chocolatés typiques, bien qu'ils soient consommés à plus de 90 % au cours de cette étape (**Aprotosoie et al., 2016**).

2. Composés volatils contribuant à la saveur du cacao

La saveur caractéristique du cacao et du chocolat résulte de la formation de composés volatils au cours de la fermentation, du séchage et surtout de la torréfaction. Ces transformations impliquent principalement les réactions de Maillard et la dégradation de Strecker. À ce jour, plus de 600 composés volatils ont été identifiés dans le cacao (**Cevallos-Cevallos et al., 2018**).

- ✓ Les alcools sont produits durant la fermentation par l'activité microbienne et par la dégradation des acides aminés sous l'effet de la chaleur. Ils confèrent des arômes fruités, floraux et sucrés, parmi lesquels le linalol et le 2-phényléthanol sont des marqueurs de qualité, surtout dans les cacaos fins (**Cevallos-Cevallos et al., 2018**).
- ✓ Les aldéhydes et cétones jouent un rôle clé dans le développement des notes maltées, chocolatées et florales. Ils apparaissent principalement à la torréfaction par dégradation de Strecker des acides aminés. Des composés comme le 2- et 3-méthylbutanal renforcent le profil aromatique, tandis que l'acétophénone ajoute des notes florales et sucrées (**Cevallos-Cevallos et al., 2018**).
- ✓ Les esters constituent le deuxième groupe le plus important après les pyrazines. Ils apportent des notes fruitées et florales, formées en grande partie pendant la fermentation. Cependant, leur concentration diminue à des températures élevées de torréfaction, ce qui limite leur contribution à l'arôme **final** (**Cevallos-Cevallos et al., 2018**).
- ✓ Les pyrazines représentent la classe dominante de composés hétérocycliques. Elles confèrent des notes de noisette, torréfiées et chocolatées, essentielles au profil aromatique du cacao. La tétraméthylpyrazine, très abondante, est considérée comme un indicateur de la qualité et du degré de torréfaction (**Cevallos-Cevallos et al., 2018**).
- ✓ Les acides organiques, tels que l'acide acétique, s'accumulent pendant la fermentation. Ils apportent des notes aigres aux fèves mais sont en grande partie réduits au séchage et à la torréfaction. Un excès, lié à une fermentation prolongée, entraîne des saveurs indésirables (**Cevallos-Cevallos et al., 2018**).
- ✓ Enfin, les phénols comme le phénol et le 2-méthoxyphénol, d'origine exogène (fumée de bois ou de charbon), donnent des arômes fumés et désagréables. Pour obtenir un cacao de qualité, leur présence doit rester minimale (**Cevallos-Cevallos et al., 2018**).

Tableau I. Résumé de l'étiquetage nutritionnel des poudres de cacao étudiées, pour 100 g de produit (Razola-Díaz et al., 2023).

Par 100 g de produit	Énergie (kJ)	Lipides (g)	Acides gras saturés (g)	Glucides (g)	Sucres (g)	Protéines (g)	Sel (g)
Moyenne	1457,6	16,1	9,8	16,3	1,1	21,5	0,03

V. Effets sur la santé

La consommation régulière de cacao est associée à une diminution notable du risque de maladies cardiovasculaires, et l'intérêt pour ses propriétés bénéfiques potentielles n'a cessé de croître au cours de la dernière décennie (Álvarez-Cilleros et al., 2020). Bien que certaines questions restent débattues, plusieurs mécanismes plausibles expliquent ses effets protecteurs. Grâce à sa richesse en flavonols et en autres composés bioactifs, le cacao agit comme puissant antioxydant, limitant le stress oxydatif et l'oxydation lipidique (Latif, 2013). Il contribue également à la régulation de la pression artérielle, notamment par l'augmentation de la biodisponibilité de l'oxyde nitrique et l'inhibition de l'enzyme de conversion de l'angiotensine. Ses effets antiagrégants et anti-adhésifs sur les plaquettes, comparables à ceux de l'aspirine, renforcent encore la prévention cardiovasculaire (Latif, 2013). De plus, le cacao améliore la sensibilité à l'insuline, participant à la réduction de la résistance insulinaire. Il possède aussi des propriétés antistress, liées à la stimulation de la sécrétion de sérotonine, et des effets anti-obésité, confirmés par des études animales, qui montrent une baisse du poids corporel, de l'adiposité et des triglycérides sanguins, ainsi qu'une modulation favorable de l'expression des gènes impliqués dans le métabolisme lipidique et la thermogénèse. Ainsi, le cacao se positionne comme un aliment fonctionnel aux effets multiples sur la santé cardiovasculaire et métabolique (Latif, 2013 ; Álvarez-Cilleros et al. 2020).

1. Effets sur les neurones

Des recherches récentes menées chez des individus jeunes et en bonne santé à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique ont montré que la consommation de cacao augmente le flux sanguin cérébral, ce qui suggère des avantages potentiels pour le traitement de troubles neurologiques tels que la démence et les accidents vasculaires cérébraux (Nurk, 2012). Il a rapporté une amélioration des performances cognitives associée à la consommation de chocolat. De même, (Larsson et al., 2012). Il a constaté que la consommation quotidienne de chocolat était liée à une réduction du risque d'accident vasculaire cérébral chez les hommes (Walters,

2020). Il a en outre démontré que le chocolat peut améliorer de manière significative le flux sanguin cérébral (**Walters, 2020**).

2. Effets anti tumoraux

Plusieurs études in vitro suggèrent que le cacao pourrait inhiber la croissance des cellules cancéreuses. Cependant, les mécanismes anticancéreux précis restent flous. À l'inverse, certaines recherches indiquent qu'une consommation excessive de chocolat pourrait potentiellement augmenter le risque de cancer. D'autres études précliniques et cliniques sont nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes sous-jacents des effets du cacao et évaluer son rôle potentiel dans la prévention et le traitement du cancer (**Álvarez-Cilleros et al., 2020**).

Chapitre 2 La caroube

I. Introduction

Le caroubier (*Ceratonia Siliqua L.*) est un arbre pérenne à feuilles persistantes de la famille des *Fabacées (Leguminosae)*. Originaire de la région méditerranéenne, il est aujourd'hui présent dans de nombreuses régions du monde, notamment en Amérique du Nord et du Sud, en Afrique et en Australie. Jusqu'en 1980, le genre *Ceratonia* ne comptait qu'une seule espèce, *C. siliqua*. Cependant, une autre espèce, *C. oreothauma*, a depuis été découverte en Afrique de l'Est et dans la péninsule arabe (**Dahmani et al., 2023**).

Cette plante est utilisée par l'homme depuis l'Antiquité. Elle est appréciée pour son importance économique et culinaire. Ses graines, également connues sous le nom de caroube, sont utilisées comme source de nourriture pour les humains et le bétail (**Brassesco et al., 2021**). Riches en glucides et en protéines, elles peuvent être réduites en poudre et utilisées comme substitut du chocolat (**Loullis & Pinakoulaki, 2018**). Les feuilles, l'écorce et les graines sont traditionnellement utilisées en médecine pour traiter diverses maladies, notamment la diarrhée, le diabète et l'hypertension. Outre ses utilisations culinaires, la caroube aurait plusieurs activités pharmacologiques (**Dahmani et al., 2023**).

II. Description botanique de *Ceratonia siliqua L*

1. L'arbre

Le caroubier est un arbre pérenne, résistant à la sécheresse, pouvant vivre de 100 à 500 ans. Il possède une couronne étalée, un tronc épais et fissuré, et un système racinaire pivotant profond (jusqu'à 18 m), lui permettant d'exploiter les ressources en eau des couches profondes du sol (**Asma et al., 2023**).



Figure 5. Caroubier *Ceratoniasiliqua L.*(Rima, 2021)

2. Les feuilles

Elles sont persistantes, paripennées, mesurant 10 à 20 cm, composées de 4 à 8 folioles ovales, coriaces, vert foncé sur la face supérieure et plus pâles en dessous (Asma et al., 2023).



Figure 6. Les feuilles de caroubier *Ceratoniasiliqua L.*(Rima, 2021)

3. La croissance

L'arbre présente deux poussées végétatives annuelles, au printemps et en automne. La croissance est réduite en période de fructification et lorsque les températures descendent en dessous de 10 °C (Dahmani et al., 2023).

4. Les fleurs

C. siliqua L. est une espèce dioïque (pieds mâles et femelles distincts) avec parfois des fleurs hermaphrodites. Les fleurs, petites (6–12 mm), dépourvues de corolle, sont regroupées en racèmes latéraux et apparaissent surtout sur les branches âgées de plus de 2 ans. Les inflorescences femelles sont moins denses que celles des mâles et des hermaphrodites (Dahmani et al., 2023).



Figure 7. Les fleurs de caroubier *ceratonia siliqua* L. (Rima, 2021)

5. Fruit et graine

Le fruit se présente sous la forme d'une gousse non déhiscente, mince, comprimée, droite ou incurvée, et épaissie au niveau de la suture. Elle mesure 10-30 cm de long, 1,5-3,5 cm de large, avec un apex émoussé ou subaigu, d'environ 1 cm d'épaisseur. Les gousses prennent une couleur brune en mûrissant et présentent une surface ridée et coriace. La pulpe se compose d'une couche externe dure (le péricarpe) et d'une région interne plus molle (le mésocarpe). Les graines sont disposées latéralement dans les gousses, séparées par le mésocarpe. Il y a plusieurs graines (4-15 graines), typiquement uniformes, lisses, brillantes, brunes, et ovales-oblongues (8-10 cm de long, 7-8 mm de large, et 3-5 mm d'épaisseur), difficiles à inspecter. En général, les graines des variétés greffées représentent 8 à 12 % du poids de la gousse, alors que celles des variétés sauvages non greffées représentent 16 à 20 % du poids de la gousse (Dahmani et al., 2023).



Figure 8. Les fruits et les graines de caroubier *ceratonia siliqua* L. (Rima, 2021)

III. Origine et répartition géographique

L'origine du caroubier est incertaine. La majorité des chercheurs le rattachent au bassin méditerranéen oriental, tandis que d'autres évoquent le sud de l'Arabie (Yémen) ou la Corne de l'Afrique, régions où pousse *C. oreoethauma*, son espèce la plus proche (Brassesco et al., 2021). L'espèce s'est développée dans des zones chaudes et humides, puis a su s'adapter à des climats plus secs. Elle s'est d'abord répandue au Proche-Orient et en Afrique du Nord, avant d'être introduite en Méditerranée occidentale par les Grecs et les Arabes, puis diffusée dans le monde (Europe, Amériques, Australie, Afrique du Sud, Inde, Iran, Philippines) (Rima, 2021). Au Maroc, le caroubier est spontané et cultivé, surtout dans le Rif et les Atlas, entre 0 et 1600 m d'altitude, souvent en association avec l'olivier, le lentisque ou l'arganier. Les principales populations spontanées se trouvent dans la province de Khénifra. Outre son intérêt écologique (résistance aux conditions arides et sols pauvres), il joue un rôle socio-économique notable : il représente environ 8 % de la production végétale dans le nord du pays et constitue une ressource prometteuse pour le développement des zones marginales (Boubkar et al., 2021).

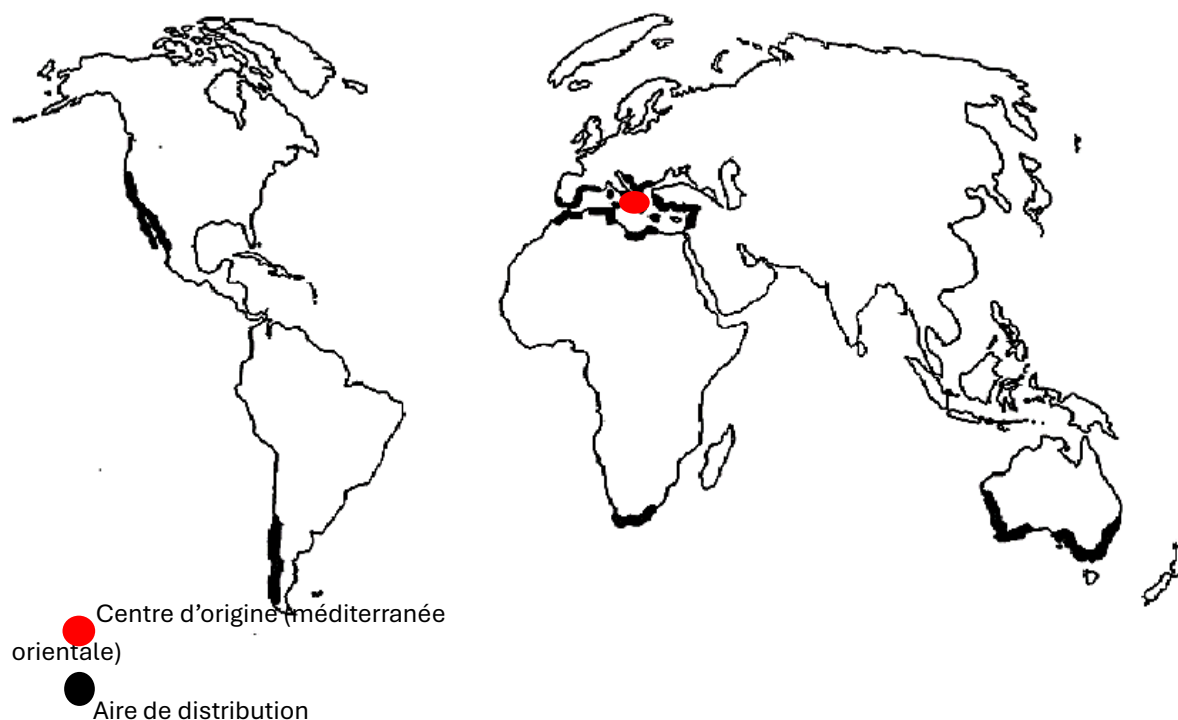


Figure 9. Centre d'origine et distribution du caroubier dans le monde (Batlle et Tous, 1997)

IV. Application alimentaire de la caroube *C. Siliqua L*

Aujourd'hui, la poudre de caroube est largement étudiée comme substitut du cacao dans divers produits alimentaires. Dans le chocolat blanc, son incorporation a permis d'augmenter légèrement la teneur en protéines, mais surtout d'accroître de façon significative les fibres et les sucres. L'ajout progressif de poudre de caroube élève également les concentrations en calcium, potassium, magnésium et sodium, tandis que le fer et le zinc diminuent. L'effet le plus marqué est l'élimination progressive de la caféine, totalement absente lorsque le cacao est remplacé à 100 %. Sur le plan sensoriel, aucune différence notable d'arôme n'a été relevée (Abu Hafsa et al., 2017).

Dans la pâtisserie, la caroube est utilisée comme substitut du cacao ou d'autres ingrédients (banane, soja) dans la fabrication de gâteaux sans gluten. Elle permet d'augmenter les calories, les lipides et les glucides, tout en augmentant les fibres. Cependant, elle diminue la résilience, l'élasticité et la cohésion des produits. Néanmoins, des gâteaux contenant jusqu'à 75 % de caroube présentent des propriétés sensorielles comparables à ceux à base de cacao, tout en offrant un intérêt particulier pour les patients atteints de maladie cœliaque (Abu Hafsa et al., 2017).

La poudre de caroube est également employée dans la préparation de boissons chocolatées ou lactées. Selon le procédé (utilisation de pulpe torréfiée ou non, et variété choisie), elle permet d'obtenir des boissons riches en polyphénols et en activité antioxydante. La torréfaction améliore les qualités sensorielles (arômes de café, caramel, moka, amertume légère, viscosité), grâce à la formation de composés volatils caractéristiques tels que les pyrazines, pyridines, cétones et aldéhydes (Ayache et al., 2021 ;Afoakwa, 2016).

Certains aliments fonctionnels issus de la caroube sont regroupés dans le tableau 2.

Tableau II. Aliments fonctionnels enrichis en caroube et leur impact sur la qualité du produit (Ikram et al., 2023).

Produits alimentaires à base de caroube	Impact positif
Pain enrichi avec de la farine de gousses de caroube	Amélioration de la qualité du pain, teneur élevée en antioxydants et en composés phénoliques, et amélioration des attributs organoleptiques
Caroube à tartiner	Amélioration de la texture et de la couleur, et bonne source de minéraux
Boissons lactées à base de poudre de caroube	Teneur phénolique élevée, activités antioxydantes, amélioration de la couleur, du goût, de la texture et de l'acceptabilité globale.
En-cas à base de riz enrichi de poudre de pois et de caroube	Attributs organoleptiques et texturaux améliorés et teneur élevée en composés phénoliques et antioxydants
Yaourt à base de poudre de caroube	Produire des yaourts à faible teneur en matières grasses, à forte teneur en fibres, à faible teneur en lactose et à pouvoir sucrant accru.
Gâteaux sans gluten à base de poudre de caroube	Teneur améliorée en fibres alimentaires, teneur calorique plus faible, riche en protéines, cohésion réduite et bons attributs sensoriels.
Pâtes à base de farine de caroube	Teneurs phénoliques élevées, capacités antioxydantes supérieures, indice glycémique (IG) plus élevé et attributs sensoriels améliorés

Le sirop de caroube est utilisé comme substitut du sucre	Augmentation de la fermentation, réduction de l'activité microbienne et augmentation du rendement
Enrobage comestible de produits à base de gomme de caroube	Améliorer l'aspect physique, augmenter la durée de conservation, minimiser les pertes de composés bioactifs et réduire le processus d'oxydation.
Produits de boulangerie à base de gomme de caroube	Increase rheological properties, improve yield of bakery items, and increased water absorption capacity
Glace à base de caroube	Utilisé comme stabilisateur, pour diminuer le point de fusion et augmenter la viscosité.

V. Composition chimique et nutritionnelle :

La caroube se compose de deux parties principales : la pulpe, qui représente environ 90 % du fruit, et les graines contenues dans la gousse (Brassesco et al., 2021).

La gousse est particulièrement riche en sucres (45–56 % du poids total), dominés par le saccharose (jusqu'à 95 %), suivis de faibles proportions de glucose (2–4 %) et de fructose (6–7 %). Des sucres mineurs tels que le maltose, la raffinose, le stachyose, le verbascose et les xyloses y ont également été identifiés (Gioxari et al., 2022)

Les fibres alimentaires constituent jusqu'à 40 % de la gousse, dont 70 % sous forme insoluble (cellulose, hémicellulose, lignine). La caroube est également une source importante de composés phénoliques (acides phénoliques, gallotanins, flavonoïdes), qui lui confèrent une forte activité antioxydante. Sur le plan minéral, elle apporte notamment du potassium (970–1089 mg/100 g), du calcium (266–319 mg/100 g), du phosphore (76–79 mg/100 g) et du magnésium (55–56 mg/100 g). En revanche, sa teneur en matières grasses reste faible (0,2–1,0 %) (Gioxari et al., 2022).

La pulpe se caractérise par une forte teneur en sucres (48–56 %), essentiellement du saccharose (32–38 %), du glucose (5–6 %) et du fructose (5–7 %). Elle contient également une proportion notable de fibres insolubles (68,4 %), des composés phénoliques (acide gallique, gallotanins), ainsi que des vitamines antioxydantes (C et E). En revanche, elle reste pauvre en lipides (0,2–0,6 %) et en protéines (\approx 3 %) (Gioxari et al., 2022).

Tableau III: Composition de la poudre de caroube (valeur nutritionnelle moyenne pour 100g) (Youssef et al., 2013).

Valeur nutritionnelle moyenne pour 100 g de poudre	
Apport énergétique	
Calories	535k Cal
Joules	535k Cal
Matières grasses	31g
Carbohydrates	56g
Protéines	8g
Vitamines	
Vitamines liposolubles	µg / 100 g.
Vitamine A	1.407
Vitamine D	5.377
Vitamine E	4.9
Vitamines hydrosolubles	mg / 100 g
Vitamine C	830.08
Vitamine B2	0.38
Vitamine B6	23.80
Vitamine B12	1.30
Acide folique	41.97
Niacine	185.68

Tableau IV: Composition de la poudre de caroube (valeur nutritionnelle moyenne pour 100g) (Youssef et al., 2013).

Eléments minéraux	
Calcium	303 mg
Fer	1.29 mg
Magnésium	36 mg
Phosphore	126mg
Potassium	633mg
Sodium	107 mg
Zinc	3.53 mg
Cuivre	0.183 mg
Manganèse	0.14G

VI. Les bienfaits de la caroube pour la santé

Nombreuses études ont révélé les bienfaits de la caroube ainsi que ses sous- produits qui peuvent être considérés comme bénéfiques pour la santé en favorisant la guérison et la prévention des maladies chroniques (Brassesco et al., 2021)

1. Propriétés antioxydantes

Les espèces réactives de l'oxygène (ERO) et de l'azote (ERN), produites par le métabolisme cellulaire ou par des sources externes (pollution, tabac, rayonnements, alcool), peuvent avoir des effets bénéfiques à faibles concentrations, mais à des niveaux élevés elles entraînent un stress oxydatif, responsable de dommages cellulaires et associé à diverses

maladies chroniques et dégénératives. Pour contrer ce stress, l'organisme utilise des systèmes antioxydants endogènes (superoxyde dismutase, catalase, glutathion peroxydase) et non enzymatiques (glutathion, vitamines C et E, caroténoïdes, polyphénols, acides gras oméga-3 et 6). La caroube possède une activité antioxydante importante, liée notamment à sa richesse en composés phénoliques et à la maturité du fruit. Des études ont montré que ses extraits peuvent également réduire la production d'acide hypochloreux (HOCl), renforçant ainsi leur rôle protecteur contre le stress oxydatif (**Brassesco et al., 2021**).

2. Propriétés anti-hyperglycémiques

L'inhibition des enzymes α -amylase et α -glucosidase, impliquées dans le diabète de type 2, constitue une stratégie thérapeutique importante pour la régulation de la glycémie. Ces enzymes libèrent du glucose dans le sang, ce qui entraîne une hyperglycémie postprandiale. Les inhibiteurs de ces enzymes ralentissent la digestion et réduisent l'absorption du glucose, limitant ainsi l'élévation de la glycémie après les repas. Des études ont montré que la poudre de caroube et ses fractions digérées présentent un effet inhibiteur sur l' α -amylase et l' α -glucosidase lors de la digestion gastro-intestinale. Les principaux composés bioaccessibles identifiés étaient l'acide gallique, l'acide chlorogénique, la catéchine et la rutine (**Ait Chait et al., 2020**).

Par ailleurs, l'extrait aqueux de gousses de caroube immatures a également démontré une capacité à réduire l'absorption intestinale du glucose. Cette activité hypoglycémisante est attribuée à leur richesse en polyphénols, flavonoïdes et fibres alimentaires, dont la complexité, le poids moléculaire élevé et la viscosité retardent l'absorption du glucose (**Rtibi et al., 2015**).

3. Propriétés gastro-intestinales

Les troubles gastro-intestinaux (TGI) sont une cause majeure de décès dans le monde. Des études ont été menées pour évaluer les effets protecteurs de l'extrait aqueux de gousses de caroube (EAGC) sur la muqueuse intestinale. Une étude chez des rats a montré que l'EAGC avait des effets protecteurs contre les ulcérations gastriques en raison de ses propriétés antioxydantes (**Rtibi et al., 2017**). L'EAGC a également été étudié dans le contexte de troubles gastro-intestinaux multifactoriels tels que la constipation et la diarrhée. Des résultats ont montré que l'EAGC matures augmentait le transit gastro-intestinal, tandis que l'extrait des gousses immatures avait un effet inhibiteur. Cette différence est attribuée à la composition chimique des deux extraits, avec une teneur élevée en fibres et en sucres dans les gousses matures. En ce qui

concerne la colite ulcéreuse ; une maladie gastro-intestinale liée à l'inflammation et au stress oxydatif, l'extrait de caroube a montré des effets protecteurs du côlon en réduisant la gravité des lésions et des altérations biochimiques de ce dernier. Ces effets bénéfiques sont attribués à la teneur élevée en polyphénols de la caroube (Aboura et al., 2017).

Tableau V. Avantages pour la santé des composés bioactifs présents dans la caroube (Ikram et al., 2023).

Composés bioactifs	Avantages pour la santé
Polyphénols, acide gallique, épigallocatechine, catéchine, quercétine, myricétine, kaempférol et rutine	Activités antioxydantes, anti-inflammatoires, antibactériennes, efficaces contre les troubles neurogénératifs et antitumorales.
D-pinitol	Effet anticancéreux et antidiabétique
Tanins	Effet antidiarrhéique
Acide cinnamique	Activités antioxydantes et effet hépatoprotecteur
Galactomannane	Efficace pour la santé gastro-intestinale
Chlorogenic acid and epicatechin	Réduire l'absorption intestinale du glucose et les activités laxatives
Glycosides de flavonol	Augmentation du métabolisme des lipides et réduction du taux de LDL

VII. Impact économique :

La culture du caroubier revêt une grande importance à la fois économique et environnementale dans de nombreuses régions méditerranéennes. Grâce à sa résistance aux conditions climatiques difficiles, il constitue une ressource agricole durable et contribue à la préservation des écosystèmes fragiles. Sur le plan économique, la production de caroube représente une source de revenus significative pour les populations locales et a longtemps été considérée comme une « richesse agricole » en raison de sa valeur commerciale. Les fruits sont

principalement exploités pour l'extraction de l'endosperme, utilisé dans l'industrie alimentaire, notamment pour la production de sirop et d'épaississants naturels. Les graines et les sous-produits de la caroube trouvent également des applications variées, allant de l'alimentation animale à la production de bioénergie (figure 11)

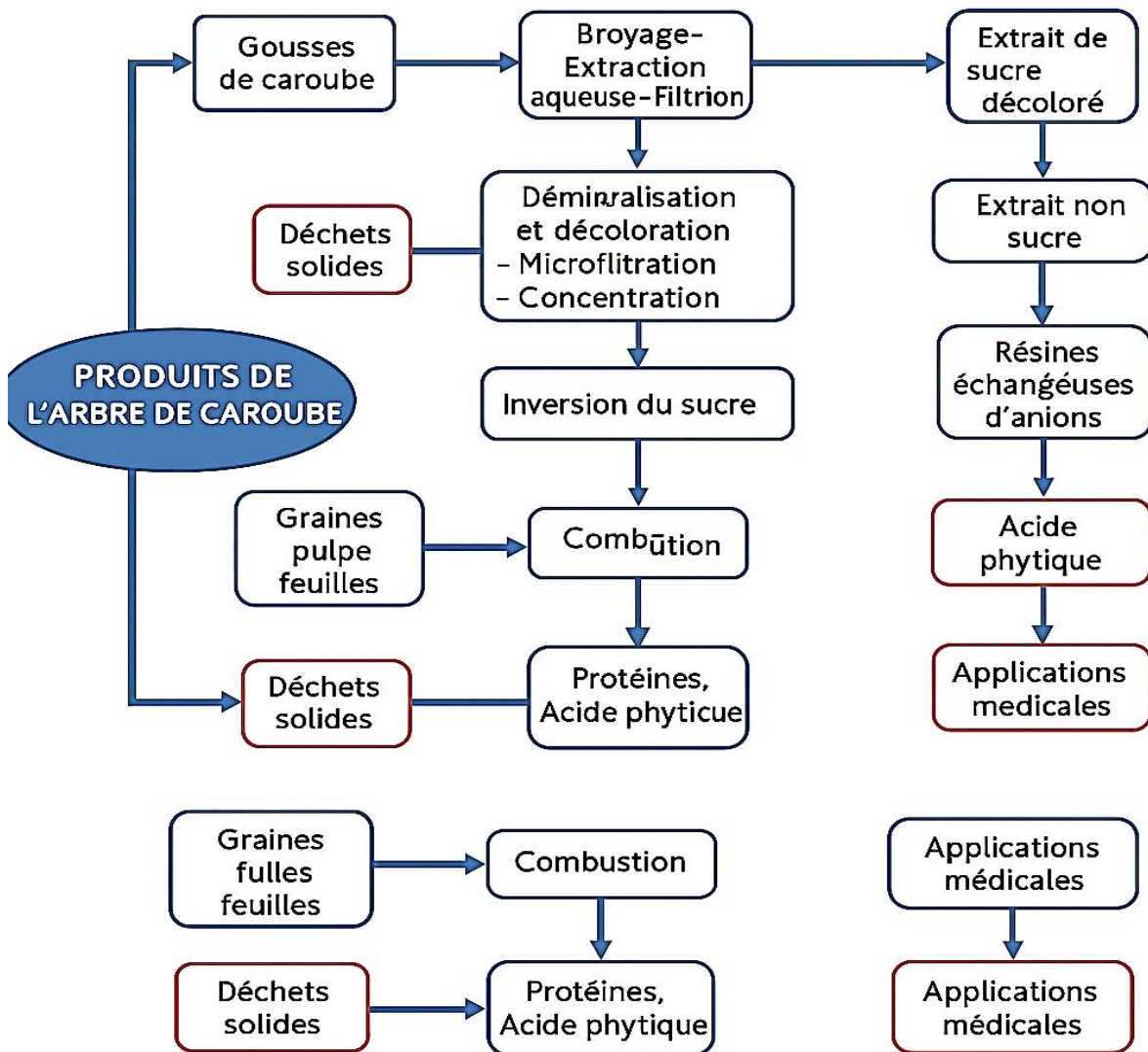


Figure 10. Produits du caroubier (Ikram et al., 2023).

Les cultures de caroubier offrent un fort potentiel de viabilité économique, notamment en raison des effets bénéfiques de la caroube sur la santé. Bien que les fibres et les polyphénols issus de la caroube soient encore peu exploités, des études pharmacologiques ont mis en évidence leurs importantes propriétés thérapeutiques. Ces composés trouvent aujourd'hui leur place dans la formulation d'aliments fonctionnels modernes, de compléments nutritionnels et de médicaments à base de plantes. Par ailleurs, des recherches complémentaires sont nécessaires afin de valoriser pleinement le LBG (gomme de caroube) en tant que vecteur de principes actifs, ainsi que le D-pinitol en tant que molécule bioactive prometteuse dans le

traitement du diabète. En définitive, l'exploitation de ces applications pharmaceutiques permettrait de transformer le fruit du caroubier en une source de produits à haute valeur ajoutée (Alshareef, 2025).

Chapitre 3 Le chocolat

I. Histoire et origine

Les origines du chocolat sont très anciennes et remontent généralement au peuple maya, qui fut probablement le premier à cultiver le cacaoyer, en 400 après J.-C. La plante que nous connaissons aujourd'hui est le résultat de croisements et de sélections qui ont commencé il y a déjà 35 000 ans (Verna, 2013).

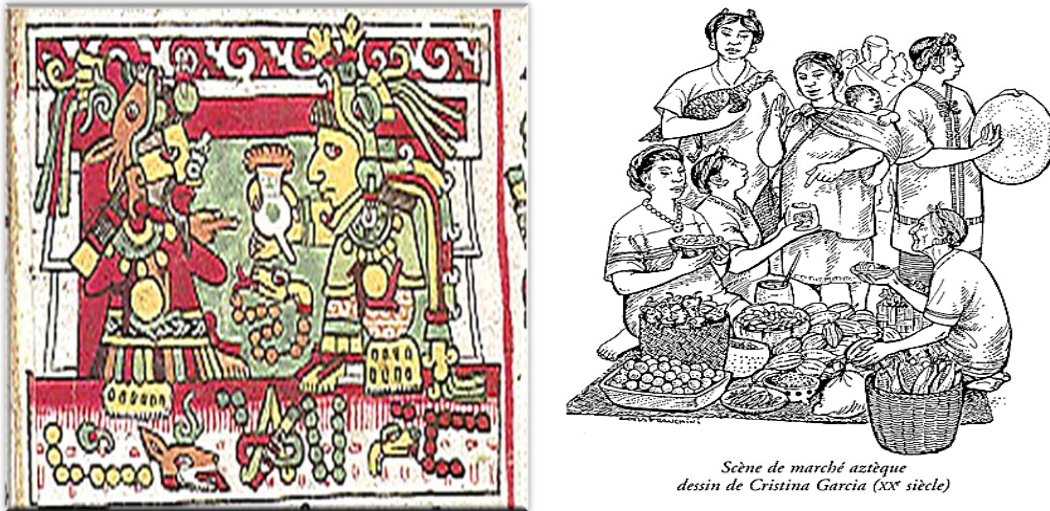


Figure 11. Chocolat à boire Montezuma (Verna, 2013).

Le cacao arriva en Europe en 1528 par Hernán Cortés qui présenta au roi Charles d'Espagne les bienfaits de cette boisson « or brun » (Montagna et al., 2019). À la fin du XVI^e siècle, les premières descriptions botaniques du cacaoyer furent publiées et la première cargaison arriva à Séville, permettant la propagation du chocolat dans l'Ancien Monde (Lippi, 2013).

Dès 1650, le chocolat se répandit au Portugal et sa consommation se développa avec la culture du cacao au Brésil, en particulier dans le Pará en 1678 (Dias, 2025). À la fin du XVIII^e siècle, Joseph Fry utilisa une machine à vapeur pour broyer les fèves, ce qui rendit la production plus rapide et le chocolat plus abordable (Coe et Coe, 1996). En 1828, Van Houten a créé la presse hydraulique qui a permis de séparer le beurre de cacao des solides secs et d'obtenir une poudre de qualité supérieure, même si elle laisse encore une partie de matière grasse non utilisée. Peu de temps après, Fry and Sons parvinrent à produire du chocolat solide en incorporant une quantité supplémentaire de beurre de cacao au mélange de sucre et de cacao (Coe et Coe, 1996). La fabrication du chocolat solide a débuté en Grande-Bretagne dès 1847, cependant c'est au cours du XX^e siècle qu'il a surpassé le chocolat à boire (Richardson, 2003).

L'augmentation de la demande a par la suite conduit à l'établissement de la culture du cacao dans les colonies africaines et asiatiques, ce qui a réduit les coûts et a largement contribué à la popularité de ce produit. Finalement, deux avancées importantes originaires de Suisse en 1897 ont rendu possible la stabilisation du chocolat au lait, permettant ainsi la fabrication de tablettes plus durables. C'est donc au cours du vingtième siècle que les barres chocolatées modernes ont réellement vu le jour (Cidell & Alberts, 2006).

II. Types de chocolat

Les principales catégories de chocolat sont le chocolat noir, le chocolat au lait et le chocolat blanc, qui se distinguent par leur teneur en cacao, en matières grasses laitières et en beurre de cacao. Ces différences entraînent des variations dans les proportions de nutriments essentiels, tels que les glucides, les lipides et les protéines.

1. Chocolat noir

Le chocolat noir contient des solides de fèves de cacao (jusqu'à 80 % du poids total) et du beurre de cacao. Avec son arôme intense et persistant de cacao, il fond dans la bouche, laissant un arrière-goût agréable et amer (Montagna et al., 2019). Il conserve une quantité importante de polyphénols, de flavonoïdes, de procyanidines et de théobromine, ainsi que des vitamines et des minéraux qui contribuent à renforcer le système immunitaire et à maintenir une bonne santé générale (Tuigunov et al., 2025). Sa qualité dépend du pourcentage de cacao. La plupart des bienfaits pour la santé attribuable au chocolat.



Figure 12. Chocolat noir sous forme de tablettes (Gutiérrez, 2017).

2. Chocolat blanc

Le chocolat blanc doit contenir, sur la matière sèche, au moins 20% de beurre de cacao et au moins 14% d'extraits secs laitiers (dont un minimum de 2,5% à 3,5% de matière grasse laitière comme appliqué par l'autorité compétente conformément à la législation en vigueur). Les « extraits secs laitiers » correspondent à l'adjonction d'ingrédients du lait dans leurs proportions naturelles, excepté que la matière grasse laitière peut être ajoutée ou retirée. (CODEX STAN 87-1981, Rév. 1 – 2003).



Figure 13. Chocolat blanc (anonyme, 2025).

3. Chocolat au lait

Le système du chocolat au lait est une dispersion de particules solides (cacao, sucre et lait en poudre) dans une phase grasse composée principalement de beurre de cacao. Le chocolat au lait se caractérise par une valeur énergétique élevée, ce qui indique un déséquilibre entre les macro et micronutriments dans sa composition. La valeur nutritionnelle et biologique du chocolat au lait est déterminée par la composition de sa recette et les caractéristiques des matières premières. Il convient de noter que le chocolat au lait se caractérise par une teneur élevée en sucres ajoutés et en matières grasses, ainsi que par un faible potentiel antioxydant. Dans le même temps, la teneur en protéines de sa composition reste insignifiante (Tuigunov et al., 2025).



Figure 14. Chocolat au lait (« Chocolat au lait », 2025)

III. Technologie de fabrication de chocolat

La production de chocolat comprend des étapes fondamentales telles que :

A. La transformation des fèves de cacao

A.1. Récolte

La récolte des fèves de cacao doit se faire à maturité optimale. Si elles sont trop mûres, elles risquent la pourriture et la germination, tandis que des fruits récoltés trop tôt nuisent à la fermentation et augmentent le taux de fèves défectueuses, réduisant ainsi le rendement (**Figure 16**). Si les fruits près du sol peuvent être récoltés avec un canif, un couteau ou un sécateur. Les fruits en hauteur peuvent être récoltés avec une *desgarretadera*, un couteau courbé fixé à un long manche. L'usage de machettes pour récolter les fruits en hauteur est à éviter car cela augmente le risque de rayer le tronc ou d'endommager la « cauliflory » qui produit les fleurs, ainsi que de blesser l'opérateur (**Gutiérrez, 2017**).



Figure 15. Mode de récolte des gousses de cacao (A: Un opérateur récolte les fruits du cacaoyer à l'aide d'un sécateur, B: à l'aide d'une desgarretadera (Gutiérrez, 2017).

A.2. Fermentation

Les fèves fraîches provenant des cabosses sont habituellement placées dans des caisses, des paniers ou entassées en monticules, puis recouvertes de feuilles de bananier pour démarrer une fermentation en milieu anaérobie. Cette étape, qui dure entre 3 et 7 jours, est cruciale pour la transformation des fèves. Elle permet entre autres la dégradation et l'élimination de la pulpe mucilagineuse et le lancement des réactions biochimiques aboutissant à la formation des précurseurs d'arômes, de couleur et de saveur typiques du cacao. La qualité de la poudre de cacao dépend de la réussite de cette étape (Beg et al., 2017).



Figure 16. Boxes de fermentation des fèves de cacao (anonyme 2022).

A.3. Séchage

Après la fermentation, les fèves de cacao sont rapidement soumises à un séchage afin de limiter les risques de détérioration liés à l'activité microbienne (Beg et al., 2017). Plusieurs techniques peuvent être employées, notamment le séchage au soleil, le séchage à l'air libre, le séchage mécanique, le séchage par micro-ondes ou encore la lyophilisation. Ces méthodes visent à prévenir le développement de moisissures, à stabiliser les composés aromatiques et à réduire la teneur en humidité des fèves. La diminution de l'humidité entraîne également une baisse de l'activité de l'eau, ce qui contribue à améliorer la conservation du produit. La température et la durée de séchage constituent des paramètres déterminants, car ils influencent directement la qualité finale des fèves de cacao. Par ailleurs, il est recommandé de privilégier des procédés de séchage limitant l'exposition aux rayons ultraviolets, à l'oxydation et à la chaleur excessive, afin de préserver les composés bioactifs essentiels à l'obtention d'un produit de haute qualité (Dzelagha et al., 2020).



Figure 17. Séchage des fèves de cacao (Kanmogne, 2012).

A.4 Torréfaction

Afin de développer pleinement leurs arômes grâce à la caramélisation et d'améliorer leur goût. Ce processus influe sur les paramètres sensoriels du produit final, le chocolat. L'application de températures élevées pendant la torréfaction permet de stériliser les fèves de cacao, mais on observe une diminution de la teneur totale en phénols et en flavonoïdes après ce processus, qui dure entre 5 et 120 minutes à une température comprise entre 120 et 150 °C (Kowalski et al., 2023).



Figure 18. Torréfaction des fèves de cacao (anonyme 2019).

A.5. Broyage

Les fèves de cacao sont broyées en une pâte fine appelée pâte de cacao ou liqueur de cacao à l'aide de divers types d'équipements tels que des broyeurs à boulets, des conches ou des raffineurs à rouleaux.

A.6. Pressage

Après la production de la pâte de cacao, celle-ci peut être transformée par pressage pour produire de la poudre de cacao et du beurre de cacao. Les solides de cacao sont utilisés pour fabriquer la poudre de cacao, tandis que le beurre de cacao sert à ajouter de la matière grasse aux produits chocolatés et à leur donner une texture onctueuse. Une étude a montré que le temps de pressage influe sur la brillance de la poudre de cacao et sa teneur en matière grasse, mais pas sur sa température (Anoraga et al., 2019).

B. Mélange et la formulation

Le chocolat peut être classé selon le type de consommation auquel il est destiné, à savoir : chocolat à boire, chocolat à manger ou chocolat d'enrobage. Le chocolat à boire est obtenu en mélangeant de la liqueur de cacao avec du sucre, du beurre de cacao, des émulsifiants et des arômes. Le chocolat à manger (noir, au lait et blanc) est fabriqué à partir de liqueur de cacao, de sucre, de beurre de cacao et d'émulsifiants, ainsi que d'additifs facultatifs tels que du lait entier ou écrémé, des solides du lait (pas de lactosérum) et d'autres ingrédients tels que des noix, des fruits, des céréales, des crèmes, des liqueurs et des sirops (Gutiérrez, 2017).

C. Raffinage

La liqueur de chocolat est affinée dans une machine appelée conche, qui mélange et aère le chocolat afin de développer sa texture et sa saveur (Toker et al., 2019).



Figure 19. Le raffinage de chocolat (anonyme 2019).

D. Conchage

Le chocolat est obtenu en mélangeant la liqueur de cacao, le sucre et le beurre de cacao, puis en broyant le mélange jusqu'à une taille de particules inférieure à 30 μm . Avant de poursuivre la fabrication, les particules solides sont enrobées de matière grasse grâce au conchage, réalisé à environ 30 °C pendant plusieurs heures. Cette étape, qui améliore la texture et le goût du chocolat, réduit sa viscosité et élimine l'humidité ainsi que les composés volatils, est essentielle pour la qualité finale du produit. Le conchage se déroule en trois phases successives : d'abord l'enrobage des particules et l'évaporation de l'humidité, ensuite l'intensification des arômes sous température contrôlée, et enfin la liquéfaction et l'homogénéisation complète de la masse de chocolat (Gutiérrez, 2017).



Figure 20. Le conchage (anonyme 2016).

E. Tempérage

Consiste à chauffer le chocolat et à le refroidir à des températures spécifiques afin de garantir qu'il présente le type de cristaux et la texture appropriés. Ce processus, qui donne au chocolat son aspect brillant, contribue également à empêcher la formation de bulles d'air. Le tempérage permet d'obtenir une configuration cristalline plus stable de la graisse, ce qui confère au chocolat son aspect brillant, son croquant et sa texture fondante à la température du corps. Le tempérage confère également une résistance au blanchiment gras et provoque un léger rétrécissement du chocolat lorsqu'il durcit, ce qui facilite le démoulage. Le chocolat tempéré est ensuite moulé en tablettes, en bonbons ou en différentes formes, puis conditionné sous forme de produits chocolatés (Quiñones-Muñoz et al., 2011; Gutiérrez, 2017).



Figure 21. Équipement de tempérage (Gutiérrez, 2017).

F. Moulage

Le moulage est la méthode la plus couramment utilisée pour former le chocolat. Les moules en métal, autrefois employés, ont été remplacés par des moules en plastique ou en silicone, plus légers, moins coûteux et plus faciles à manipuler, notamment lorsque de nombreux moules doivent être changés selon la forme du produit. Avant le moulage, les moules sont préchauffés à une température proche de celle du chocolat tempéré afin de faire fondre les cristaux instables et d'éviter une solidification incorrecte de la matière grasse. Le chocolat est ensuite versé uniformément dans les moules, et les bulles d'air sont éliminées par agitation jusqu'à ce que le chocolat se solidifie (Gutiérrez, 2017).



Figure 22. Moules prêts pour le remplissage (Gutiérrez, 2017; El Gebaly, 2018).

G. Emballage, stockage et distribution

La température de la salle d'emballage est généralement maintenue entre 18 et 20 °C, avec une humidité relative inférieure à 50 % afin d'éviter la condensation des produits finis à leur sortie du tunnel de refroidissement. Étant donné qu'environ 25 % du beurre de cacao (dans les enrobages) est encore à l'état liquide après refroidissement, ces produits ne doivent pas être emballés directement. Ils sont donc stockés dans un conteneur dans un environnement froid pendant 24 heures maximum afin de permettre la dissipation complète de la chaleur latente de cristallisation et la solidification du beurre de cacao liquide.

Il est extrêmement important d'éviter les fluctuations de température pendant le stockage, car celles-ci peuvent accélérer la formation d'un aspect opaque et l'apparition de gras. Les produits chocolatés peuvent être congelés après avoir été stabilisés pendant 48 heures afin de prolonger leur durée de conservation. Lors de la décongélation, les produits congelés doivent être stockés à des températures progressivement plus élevées et laissés reposer à chaque étape afin d'éviter la condensation jusqu'à ce que le produit se stabilise à température ambiante. Après stockage, les produits chocolatés doivent être transportés dans des véhicules à température contrôlée (10 à 15,6 °C) afin d'éviter le détrempeage. La pratique courante consiste à expédier les produits dans des unités de transport réfrigérées, sauf si les températures extérieures sont basses (Gutiérrez, 2017).

IV. Composition du chocolat

1. Composition chimique

La composition des fèves de cacao varie en fonction de facteurs génétiques et environnementaux (Żyżelewicz et al., 2021). Selon les analyses réalisées sur différents lots de

fèves, leur teneur en cendres varie de 0,9 % à 7,3 %, tandis que leur teneur en fibres se situe entre 3,1 % et 19,4 %. (Aremu et al., 1995 ; Lippi, 2015 ; Djikeng et al., 2018 ; de Melo et al., 2020 ; Grassia et al., 2021). Les fèves de cacao contiennent entre 8 % et 54 % de glucides, comprenant des monosaccharides, des disaccharides, des oligosaccharides, des alcools de sucre, de l'amidon et des fibres alimentaires (Liendo et al., 1997 ; de Melo et al., 2020). En raison de sa teneur élevée en glucides, il est bien connu pour ses propriétés bioactives (Barišić et al., 2019). La composition des glucides est importante pour le développement du goût dans la fabrication du chocolat (Jean-Marie et al., 2022). Les protéines constituent 7,9 % à 22,5 % du poids sec des fèves de cacao (Agus et al., 2018 ; de Melo et al., 2020). Elles contiennent principalement des protéines d'albumine et de globuline (Rawel et al., 2019 ; Jean-Marie et al., 2022) riches en lysine, acide glutamique, acide aspartique, arginine et leucine (Barišić et al., 2019 ; Jean-Marie et al., 2022). La détermination des arômes à base de protéines peut être cruciale pour le développement des arômes dans la fabrication du chocolat (Rawel et al., 2019). En outre, les fèves de cacao contiennent 33 % à 62 % de beurre de cacao, composé presque exclusivement de triacylglycérols (TAG) (de Melo et al., 2020). Les TAG contiennent des quantités variables d'acides palmitique, stéarique et oléique, allant de 24 % à 38 %, et de faibles quantités d'acide linoléique (Barišić et al., 2019 ; Febrianto et al., 2022). La composition du beurre de cacao, son extractibilité, son point de fusion et ses propriétés de cristallisation sont des critères importants pour la production de chocolat (Barišić et al., 2019). Ces facteurs influencent considérablement la texture, la saveur et la qualité globale des produits chocolatés, soulignant l'importance de comprendre la composition des TAG et les caractéristiques du beurre de cacao dans le processus de production du chocolat (Saritaş et al., 2024)

2. Compositions nutritionnelles

Le chocolat est un aliment apprécié dans le monde entier. En raison de sa teneur élevée en sucre et en matières grasses. Cependant, le chocolat et le cacao contiennent un certain nombre de minéraux et de vitamines essentiels, ainsi que des composants bioactifs non nutritifs, notamment des polyphénols, des méthyl xanthines et des acides gras monoinsaturés Le chocolat est un aliment apprécié dans le monde entier. Cependant, le chocolat et le cacao contiennent un certain nombre de minéraux et de vitamines essentiels, ainsi que des composants bioactifs non nutritifs, notamment des polyphénols, des méthyl xanthines et des acides gras monoinsaturés (Lambert, 2017).

2.1. Macronutriments

Le chocolat contient des quantités variables de macronutriments énergétiques, selon le type de chocolat et la quantité de cacao solide présente. Le tableau suivant indique la quantité de lipides, de protéines et de glucides, ainsi que l'apport énergétique présents dans les principaux types de chocolat solide.

Tableau VI. Teneur typique en macronutriments et en énergie des principaux types de chocolat solide (Lambert, 2017).

Type de chocolat	Protéines(g)	Lipides(g)	Glucides(g)	Energie(kcal)
Chocolat au lait	7,65	29,7	59,4	535
Chocolat blanc	5,87	32,1	59,2	539
Chocolat noir (49-59%)	4,88	31,3	61,2	546
Teneur en nutriments (pour 100 g)				

2.2. Vitamines et minéraux

Le cacao et le chocolat contiennent un certain nombre de minéraux (tableau 02). Le potassium, le magnésium et le calcium sont les minéraux les plus abondants dans la poudre de cacao. On y trouve également en quantités moindres du fer, du sélénium et du magnésium. La teneur en minéraux du cacao dépend des conditions du sol dans lequel il est cultivé. La poudre de cacao contient également de faibles quantités de plusieurs vitamines, notamment de la thiamine, de la riboflavine et de la vitamine E (tableau 02). Les concentrations finales en vitamines et minéraux dans les produits chocolatés dépendent de la quantité de solides de cacao non gras, de la quantité de beurre de cacao et de la présence d'autres ingrédients, notamment du lait et des noix, qui peuvent augmenter les teneurs en certaines vitamines et minéraux (à savoir le calcium et la vitamine E).

Tableau VII. Teneur en vitamines et minéraux du cacao et du chocolat (en mg/100 g) (Lambert, 2017).

Ingrédient	Cacao en poudre	Chocolat		
		Noir (45%-59%)	Au lait	Blanc
Fer	13.8	8	2.35	0.24
Calcium	128	56	189	199
Zinc	6.8	2	2.3	0.45
Magnésium	499	146	63	12
Manganèse	3.84	1.42	0.47	0.008
Sélénium	14.0	3.0	4.5	4.5
Potassium	1524	559	372	286
Phosphore	734	206	208	176
Thiamine	78.0	25.0	112	63.0
Riboflavine	241	50	298	282
Niacine	2.19	0.725	0.386	0.745
Vitamine B12	0	0	0.75	0.75
Vitamine E	0.1	0.54	0.51	0.96

V. Effet sur la santé

Le chocolat, grâce à ses polyphénols (notamment les flavanols), pourrait avoir des effets bénéfiques sur la santé cardiométabolique (réduction du risque de maladies cardiovasculaires, diabète, amélioration de la pression artérielle et du profil lipidique). Il favoriserait aussi les fonctions cognitives, en particulier chez les jeunes adultes et les enfants. D'autres effets potentiels, comme sur la santé de la peau ou des propriétés anticancéreuses et antimicrobiennes, restent encore incertains (**Tan et al., 2021**). Dans le tableau 3 suivant on trouve différents effets sur la santé.

Tableau VIII. Impact sur la santé lié à la consommation de chocolat (Saritaş et al., 2024).

Impact sur la santé	Type de chocolat	Resultats	Références
Maladies cardiovasculaires et maladies chroniques liées	Chocolat noir	*Présenter une réduction du risque d'hypertension essentielle *Présentent une réduction des taux plasmatiques du facteur de nécrose tumorale α	Yang <i>et al.</i> (2024) Ribeiro <i>et al.</i> (2023)
Lié à la performance	Chocolat noir	*Moduler l'inflammation induite par l'obésité *Présenter une réduction des marqueurs de stress oxydatif	Eskandari <i>et al.</i> (2020)
Lié à la santé intestinale	Chocolat noir	*Moduler la perméabilité intestinale induite par l'exercice	Nocella <i>et al.</i> (2023)
Santé dentaire	Chocolat au lait	*Présenter une augmentation du niveau d'inflammation gingivale	Fahmi <i>et al.</i> (2023)
Activités psychopharmacologiques liées	Chocolat noir	*Présenter une réduction de la fatigue *Présenter une augmentation du facteur de croissance nerveuse dans le plasma	Nemoto <i>et al.</i> (2022) Sumiyoshi <i>et coll.</i> (2019)
	Chocolat riche en flavanols	Présenter une amélioration de la mémoire de travail après une privation de sommeil	Grassi <i>et al.</i> (2016)

Partie 02

Partie expérimentale

Chapitre 1

Matériel et Méthodes

I. Matérielles et méthodes

✓ Objectif de travail

Cette étude vise à valoriser la poudre de caroube pour l'utiliser comme substituant de cacao dans les préparations alimentaires. Elle a pour objectif d'étudier ses propriétés physico-chimiques sur sa poudre pure ou mélangée au cacao avec des différentes proportions.

I. 1. Récolte et préparation du matériel végétal

Les gousses mûres de caroubes utilisées dans cette étude ont été collectées dans la région de **Makouda**, située dans la wilaya de **Tizi-Ouzou**, en Août 2024. Elles étaient séchées à l'air libre, au soleil et stockées dans des sacs à l'abri de la lumière et de l'humidité jusqu'à leur utilisation ultérieure.

Les gousses de caroubes ont été écrasées et les graines ont été enlevées. Les gousses de caroube écrasées sans graines ont été séchées dans une étuve à 105°C pendant 60 minutes. Les échantillons de caroube torréfiés ont été broyés environ 10 minutes à grande vitesse. Enfin, après le broyage, l'échantillon de caroube torréfié broyé a été tamisé à l'aide d'un tamis conventionnel d'une taille de particule de 0,18 - 0,20 mm. La poudre de caroube obtenue a été conservée dans un récipient hermétique à une température de 4 °C jusqu'au moment des analyses physicochimiques, comme la révèle la **figure 1**.

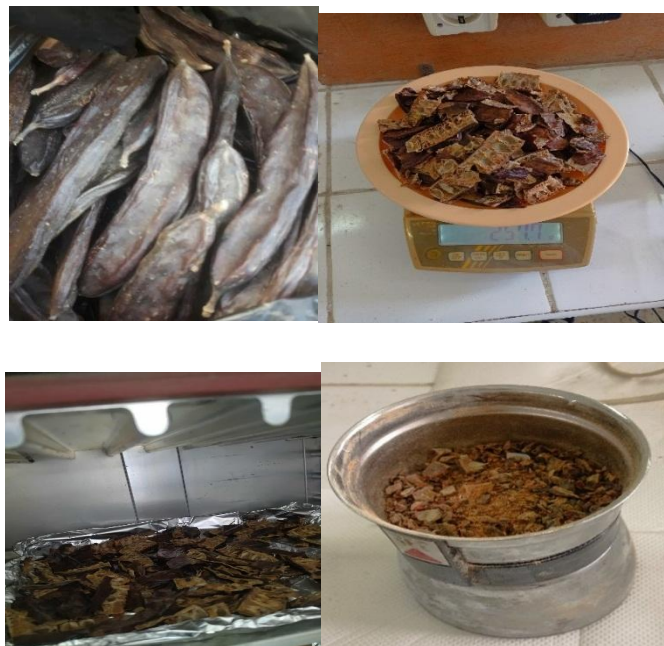


Figure 1. La préparation de la poudre de caroube (original, 2025).

I. 2. Préparations des incorporations

La poudre de caroube (pc) a été incorporée avec le cacao commercialisé à des différents pourcentages selon le tableau suivant (Tableau1)

Tableau I. Pourcentage d'incorporation

Incorporation (%)	0	20	50	80	100
Poudre de caroube (g)	0	20	50	80	100
Cacao (g)	100	80	50	20	0

I. 3. Analyses physico-chimiques des incorporations

I. 3.1- Taux d'humidité

➤ Principe

Le taux d'humidité a été déterminé en utilisant la méthode classique de dessiccation par étuvage. L'échantillon a été séché dans une étuve à une température de 105 °C jusqu'au poids constant, ce qui indique l'élimination complète de l'humidité (**Acourene et Tama, 2001 ; Caliskan et al, 2022**).

➤ Mode opératoire

Une quantité de 2 g d'échantillon est placée dans des boîtes de Pétri en verre préalablement séchées et pesées. Les boîtes contenant les échantillons sont ensuite placées dans une étuve à une température constante de 105 °C pendant 24 heures. Après refroidissement à température ambiante, chaque boîte contenant l'échantillon a été pesée individuellement. Cette expérience a été répétée trois fois pour obtenir des mesures répétées.

Le taux d'humidité est calculé en utilisant la formule suivante :

$$H (\%) = [(m1-m2) / p] * 100$$

m1 : Masse de l'échantillon + la masse de la boîte de Pétri (avant le séchage) (g)

m2 : Masse de l'échantillon + la masse de la boîte de Pétri (après le séchage) (g)

P : Masse de l'échantillon prélevé (g)

I. 3.2- Taux de cendres

➤ Principe

Le taux de cendres est déterminé en procédant à la calcination de l'échantillon à une température de 550 °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (Boussaid et al., 2020 ; Caliskan et al, 2022).

➤ Mode opératoire

Un échantillon de 2 g a été placé dans des creusets adaptés, qui sont ensuite introduits dans un four à moufle préchauffé à une température de 550 °C. L'échantillon a été soumis à une calcination pendant une période de 6 heures, permettant la combustion totale de toute matière organique présente. Après la calcination, les creusets contenant les cendres résultantes ont été retirés du four et laissés refroidir à température ambiante. Une fois refroidis, les creusets sont pesés avec les cendres obtenues. L'expérience a été répétée trois fois.

Le taux de cendre est calculé selon la formule suivant :

$$\text{Cendres (\%)} = [(m_2 - m_0) / m_1] * 100$$

m_0 : Masse du creuset vide (g)

m_1 : Masse de l'échantillon (g)

m_2 : Masse de l'échantillon incinéré + la masse du creuset (g)



Figure 2. Avant l'incinération et après des différents échantillons (original, 2025).

1.3.3- Potentiel d'hydrogène (pH)

➤ Principe

Le pH est déterminé en mesurant la différence du potentiel entre deux électrodes en verre immergées dans une solution aqueuse (Boussaid et al. 2020).

➤ Mode opératoire

Une quantité de 0,5 g de chaque échantillon a été mise en contact avec un volume de 50 ml d'eau distillée. Le mélange a été soigneusement agité à l'aide d'un agitateur magnétique pour assurer une homogénéisation complète. La solution obtenue a ensuite été soumise à une filtration pour éliminer les éventuelles particules insolubles présentes. Par la suite, le pH de la solution a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre, et la valeur affichée sur l'écran de l'appareil a été enregistrée. L'expérience a été répétée trois fois.



Figure 3. Mesure de PH a` l'aide d'un pH-mètre (Original, 2025).

I.3.4- Acidité titrable

➤ Principe

L'acidité titrable est une mesure de tous les ions hydrogène disponibles dans une solution, à la fois ceux qui sont libres dans la solution et ceux liés dans les molécules d'acide organique) Conformément à la norme (NF V05-101, 1974), l'acidité titrable est déterminée en titrant une solution aqueuse avec une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH), en présence d'un indicateur coloré, la phénolphthaléine.

➤ Mode opératoire

Une quantité de 0,5 g de chaque échantillon a été placée dans une fiole jaugée contenant déjà 50 ml d'eau distillée bouillie. Le mélange a été agité vigoureusement jusqu'à obtention d'un liquide homogène. Ensuite, le mélange a été chauffé pendant 30 min puis filtrée. Un volume de 10 ml de la solution filtrée a été prélevé à l'aide d'une pipette et déposé dans un bécher de

50 ml. À ce bécher, un volume de 10 ml d'eau distillée bouillie a été ajouté. Quelques gouttes de phénolphtaléine ont été incorporées à la solution pour servir d'indicateur coloré. La titration a été réalisée en ajoutant progressivement une solution de NaOH (0,1 N) tout en agitant, jusqu'à l'obtention d'une couleur rose persistante pendant 30 secondes. L'expérience a été répétée trois fois.

L'acidité titrable est exprimée en pourcentage selon la formule suivante :

$$\text{Acidité titrable (\%)} = (250 \times V_1 \times 100 / V_0 \times M \times 10) \times 0,07$$

M : Masse en gramme du produit prélevé

V₀ : Volume en millilitre de prise d'essai

V₁ : Volume en millilitre de la solution d'hydroxyde de solution utilisée (0,1N)

0,07 : Facteur de conversion de l'acidité titrable en équivalent d'acide citrique.

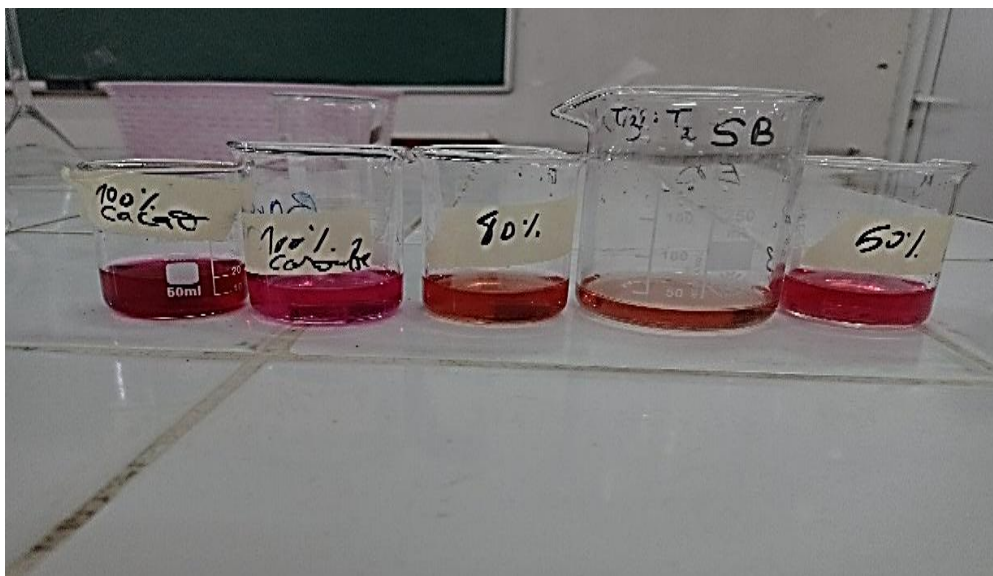


Figure 4. Détermination de l'acidité titrable (original, 2025)

I. 3.5- Degré de Brix

➤ Principe

La teneur en sucre dissous dans une solution est évaluée en utilisant les échelles de mesure du Brix, du Baume ou de l'Oechsle. Cependant, dans l'industrie alimentaire et des boissons, l'unité la plus couramment utilisée est le Brix. Il représente la concentration de solides dissous dans un liquide, mesurée à l'aide d'un réfractomètre. Un degré Brix correspond à la présence de 1 g de saccharose dans 100 g de solution (Jaywant et al., 2022).

➤ Mode opératoire

Une quantité de 1 g de l'échantillon a été mélangée avec 10 ml d'eau distillée. Le mélange a été chauffé au bain-marie pendant 30 minutes en remuant périodiquement. Après refroidissement, un volume de 20 ml d'eau distillée a été ajouté. Ensuite, le mélange a été soumis à une centrifugation. Une goutte de surnageant a été mise sur la plaque du réfractomètre préalablement nettoyé et séché avec l'eau distillée. Le degré Brix est obtenu par la multiplication de la valeur lue directement sur l'échelle du Brix du réfractomètre par le facteur de la dilution (Azab et al., 2017). Les mesures ont été répétées 3 fois.



Figure 5. Réfractomètre pour mesurer le degré Brix (original, 2025).

I. 3.6- Les polyphénols totaux

Préparation de l'extrait

A 10g de poudre de caroube a été ajoutée à 100 ml d'un mélange éthanol-eau (70 :30 v/v) ; le mélange obtenu a été laissé sous agitation pendant 72 heures à la température ambiante. L'extrait hydro-alcoolique a été récupéré après filtration du mélange à l'aide d'un papier filtre, puis le filtrat a été séché dans une étuve à 40 °C. Après séchage, l'extrait a été pesé, puis conservé au réfrigérateur (4 °C) en vue des expérimentations ultérieures (figure).



Figure 6. Séchage des extraits hydro-alcoolique dans l'étuve (original, 2025)

➤ Principe

Le dosage colorimétrique a été réalisé selon la méthode décrite par Singleton et al. (1999). Cette méthode repose sur la réduction du réactif de Folin-Ciocalteu, contenant de l'acide phosphomolybdique ($H_3PMO_{12}O_{40}$) et l'acide phosphotungstique, en un mélange d'oxydes bleus de tungstène et de molybdène lors de l'oxydation des composés phénoliques. Ces derniers présentent un maximum d'absorbance à une longueur d'onde de 760 nm, l'intensité de la coloration bleue étant proportionnelle à la quantité de phénols présents dans l'échantillon.

➤ Mode opératoire

A 0,05 ml de l'extrait, on ajoute 0,25 ml de Folin-Ciocalteu dilué au 10^{ème}. Après 5 minutes de réaction, 0,2 ml de carbonate de sodium (Na_2CO_3) à 145 g/L ont été ajoutés au mélange. Le mélange a été bien homogénéisé et l'ensemble a été incubé pendant 30 minutes à température ambiante à l'abri de la lumière et la lecture a été effectuée à 765 nm contre un blanc à l'aide d'un spectrophotomètre UV- Visible. La gamme étalon de 10 à 100 μ g/ml a été préparée dans les mêmes conditions que l'extrait. La courbe d'étalonnage a été tracée en utilisant les différentes concentrations de l'acide gallique et les résultats ont été exprimés en milligramme équivalent d'acide gallique par gramme d'extrait sec (mg EqAG/g ES).

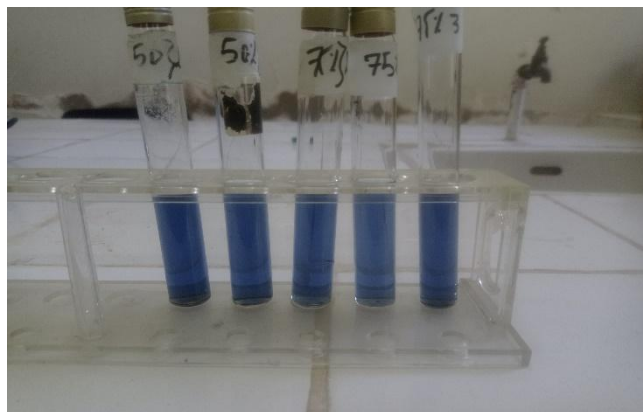


Figure 7. Dosage des polyphénols totaux par colorimétrie (original, 2025).

1.4. Analyses statistiques

Les analyses statistiques des paramètres physico-chimiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R (version 2023.03.0+386). La distribution des données a été préalablement examinée à l'aide du test de normalité de Shapiro-Wilk. Lorsque les conditions de normalité et d'homogénéité des variances étaient satisfaites, une analyse de la variance (ANOVA) a été appliquée afin d'évaluer l'existence de différences significatives entre les échantillons étudiés. En revanche, lorsque ces conditions n'étaient pas respectées, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été privilégié. En cas de différences significatives, une analyse post hoc par comparaison par paires (pairwise.t.test) a été réalisée pour identifier les groupes statistiquement distincts. Le seuil de signification statistique a été fixé à $p < 0,05$.

Chapitre 2

Résultats et Discussion

1. Taux de cendres

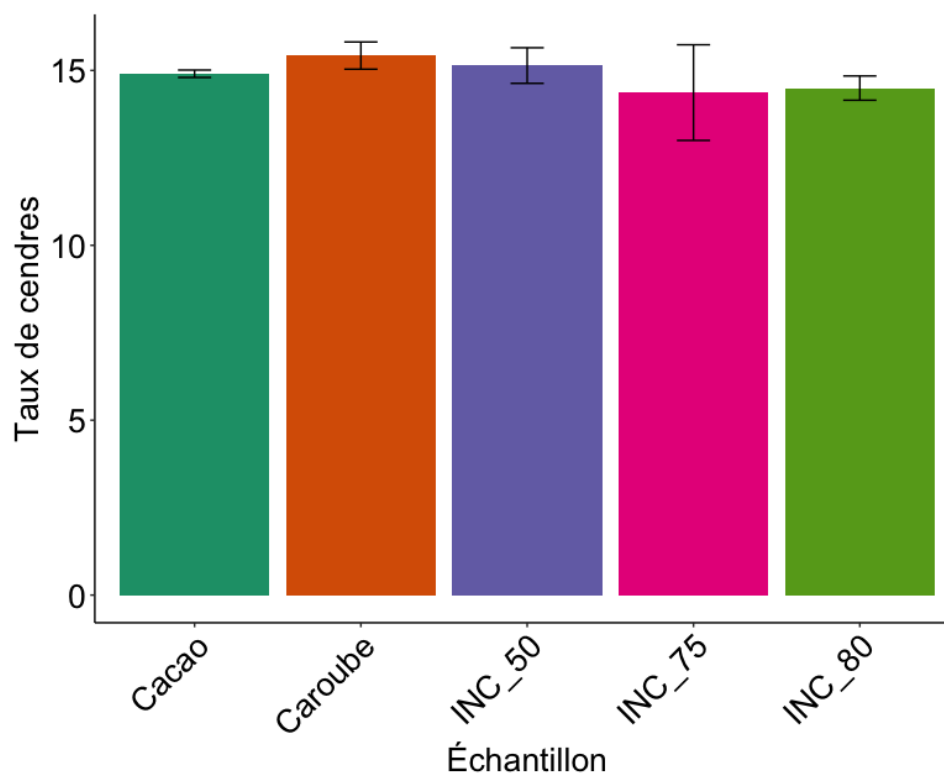


Figure 8 : Taux de cendre (%) en fonction des différents échantillons (100% poudre de cacao ; 100% poudre de caroube ; INC_50 :50% poudre de cacao, 50% poudre de caroube ; INC_75 : 75% poudre de caroube, 25% poudre de cacao ; INC_80% :80% poudre de cacao, 20% poudre de caroube)

La teneur en cendre analysée sur les différents échantillons a montré des valeurs qui varient de $14,37 \pm 1,37$ % pour l'incorporation à 75 % jusqu'à $15,42 \pm 0,39$ % pour la poudre de caroube à 100 % (Figure 01). Aucune différence statistiquement significative n'a été observée (p -value > 0,05).

En comparaison avec les données de la littérature, la teneur en cendres des éclats de cacao se situe entre $6,58 \pm 0,11$ % et $8,16 \pm 0,18$ % (Osundahunsi et al. (2007)), tandis que celle de la caroube varie entre $3,42 \pm 0,05$ % et $4,63 \pm 0,03$ % (Caliskan et al. (2022)).

Ainsi, les gousses de caroube contiennent généralement moins de cendres que le cacao, ce qui diffère des résultats obtenus dans notre étude. Ces divergences pourraient être liées à plusieurs facteurs, notamment le lieu de culture, la composition minérale du sol, les conditions

climatiques ainsi que la variété de caroube utilisée (espèces cultivées ou sauvages) (Caliskan et al., 2022).

2. Acidité titrable

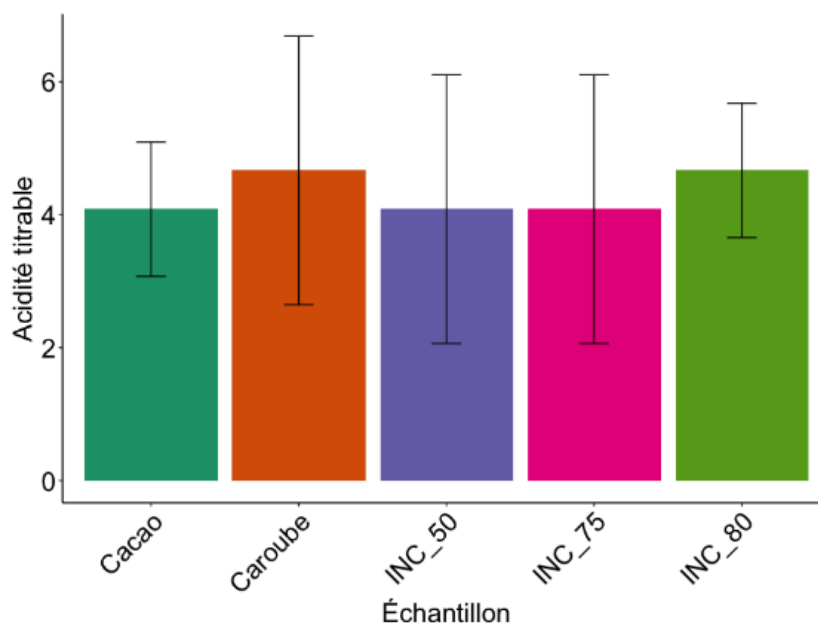


Figure 9 : Acidité titrable (%) en fonction des différents échantillons (100% poudre de cacao ; 100% poudre de caroube ; INC_50 :50% poudre de cacao, 50% poudre de caroube ; INC_75 : 75% poudre de caroube, 25% poudre de cacao ; INC_80% :80% poudre de cacao, 20% poudre de caroube)

Les résultats obtenus montrent que l'acidité titrable varie de $4,08 \pm 1,01\%$ pour la poudre de cacao à $4,67 \pm 2,02\%$ pour la poudre de caroube (Figure 02). Aucune différence significative n'a été observée entre les incorporations ($p\text{-value} > 0,05$). Les travaux de recherches rapportent des valeurs différentes des notre, elles se situe entre $0,23 \pm 0,01\%$ et $2,21 \pm 0,01\%$ pour le cacao (Umali et al., 2025), et elles varient entre $0,53 \pm 0,00\%$ à $2,68 \pm 0,09\%$ pour la caroube (Benchikh et al., 2016).

Ces écarts par rapport à nos résultats pourraient s'expliquer par plusieurs facteurs : l'origine géographique et les conditions de culture, la composition biochimique de la caroube, naturellement riche en sucres simples (glucose, fructose, saccharose $\approx 40\text{--}50\%$) mais pauvre en acides organiques, la composition minérale du sol, les conditions climatiques, ainsi que la

variété de caroube utilisée (espèces cultivées ou sauvages) (Caliskan et al., 2022 ; Goya et al., 2022).

3. Degré Brix

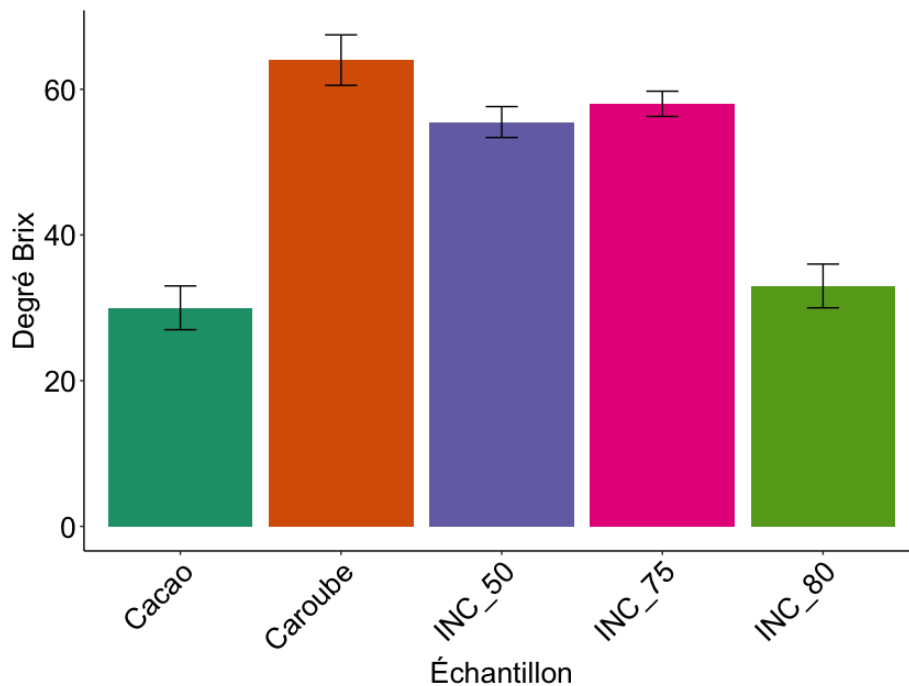


Figure 10 : Degré Brix (°Bx) en fonction des différents échantillons (100% poudre de cacao ; 100% poudre de caroube ; INC_50 :50% poudre de cacao, 50% poudre de caroube ; INC_75 : 75% poudre de caroube, 25% poudre de cacao ; INC_80% :80% poudre de cacao, 20% poudre de caroube)

Les résultats obtenus indiquent que le degré Brix varie de $30 \pm 3^{\circ}\text{Bx}$ pour la poudre de cacao à $64 \pm 3,46^{\circ}\text{Bx}$ pour la poudre de caroube (Figure 03). Des différences significatives ($p\text{-value} < 0,05$) ont été observées entre l'incorporation à 50 % et la poudre de cacao, entre l'incorporation à 80 % et la poudre de caroube, ainsi qu'entre l'incorporation à 80 % et celle à 50 %.

Selon **Tušek et Benković (2024)**, le degré Brix des éclats de cacao varie entre $17,92 \pm 0,14^{\circ}\text{Bx}$ et $20,33 \pm 0,28^{\circ}\text{Bx}$. En comparaison, **Dikkaya et al. (2020)** rapportent que les gousses de caroube présentent des valeurs nettement plus élevées, comprises entre 37 et 54 °Bx.

Ces données confirment les résultats obtenus dans notre étude, où la poudre de caroube a montré un °Bx supérieur à celui de la poudre de cacao. Cette différence s'explique par la richesse naturelle de la caroube en sucres solubles, qui peuvent représenter jusqu'à 50 % de sa composition (Dikkaya et al., 2020). Le cacao, en revanche, est essentiellement constitué de fibres, de protéines, de lipides et de polyphénols, des composés peu solubles dans l'eau et pratiquement dépourvus de sucres (Goya et al., 2022).

4. Les polyphénols

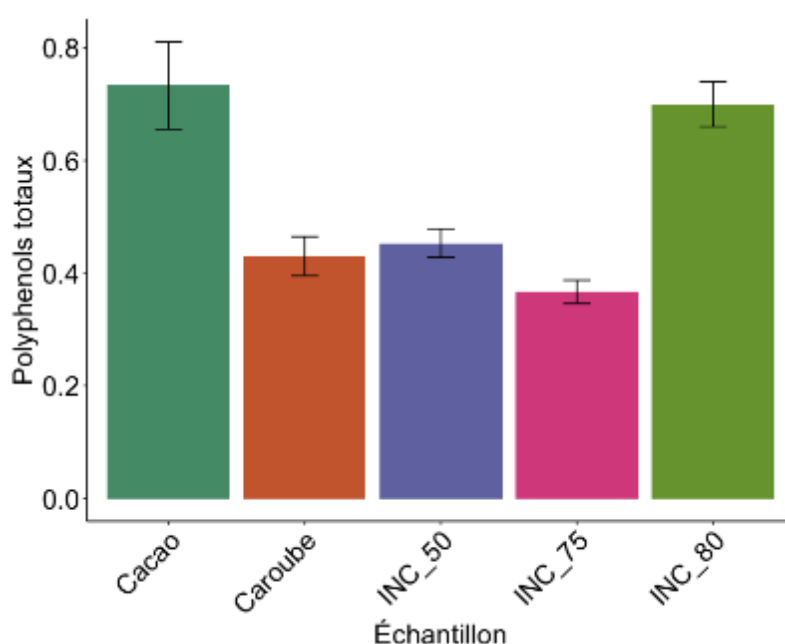


Figure 11 : la teneur en polyphénols (mg EqAG/g Matière Sèche) en fonction des différents échantillons (INC_50 :50%poudre de cacao, 50% poudre de caroube ; INC_75 :75%Poudre de caroube, 25%poudre de cacao ; INC_80 :80%Poudre de cacao ,20%poudre de caroube ; cacao :100%poudre de cacao ; caroube :100%poudre de caroube).

Les résultats obtenus indiquent que la teneur en polyphénols dans nos échantillons varie de $0,36 \pm 0,02$ mg EqAG/g MS à $0,7 \pm 0,08$ mg EqAG/g MS (figure 4). Les analyses statistiques ont confirmé des différences significatives (p -value $< 0,05$) entre les échantillons testés. Il s'agit de différences entre la poudre de cacao à 100% et la poudre de caroube à 100%, entre la poudre de cacao 100% et l'incorporation à 50%, entre poudre de cacao 100% et l'incorporation à 75%, entre le caroube 100% et l'incorporation à 80%, entre l'incorporation à 50% et l'incorporation à 80%, ainsi qu'entre l'incorporation à 75% et l'incorporation à 80%.

Selon la littérature scientifique, la teneur totale en composés phénoliques des extraits de cacao provenant de différentes variétés/cultivars et de diverses origines géographiques est de 40 mg EAG/g MS jusqu'à 173.58 ± 0.75 mg EAG/g MS. En comparaison, celle de la caroube, provenant de différentes variétés/cultivars et de diverses origines géographiques, présentent des valeurs nettement plus faibles allant de 11,6 mg EAG/g MS à 41,3 mg EAG/g MS (Loullis & Pinakoulaki, 2018). Ces données sont nettement supérieures aux résultats obtenus dans notre étude, mais confirment que la poudre de caroube présente une teneur en polyphénols totaux supérieure à celle de la poudre de cacao.

Ces différences entre les résultats trouvées pour le cacao s'expliquent par des facteurs tels que la variété végétale, la région géographique, le degré de maturité et les conditions d'après récolte (Urbańska & Kowalska, 2019). Pour la poudre de caroube, ces différences peuvent s'expliquer également par les facteurs génétiques, environnementaux et agricoles, sachant que la méthode utilisée pour l'extraction des polyphénols a une incidence significative sur leur concentration et leur profil (Loullis & Pinakoulaki, 2018).

5. Potentiel d'hydrogène (pH)

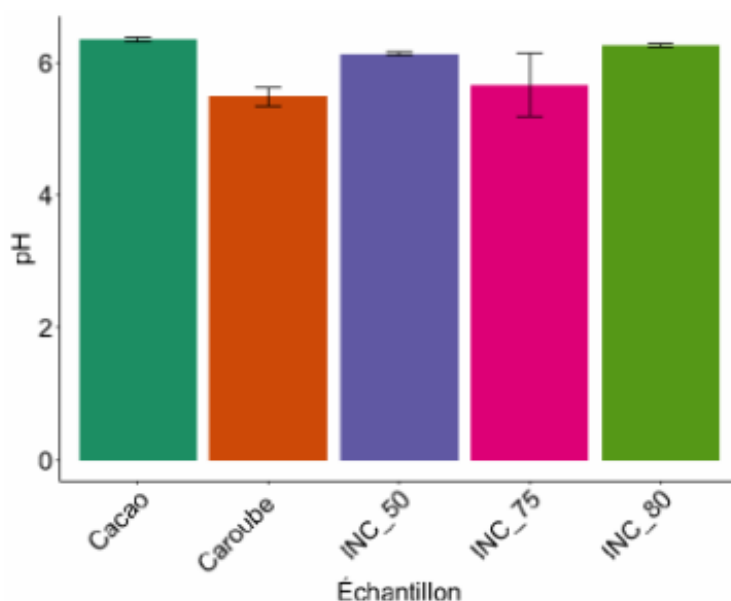


Figure 12 : la teneur de ph en fonction des différents échantillons (INC_50 :50%poudre de cacao, 50% poudre de caroube ; INC_75 :75%Poudre de caroube,25%poudre de cacao ; INC_80 :80%Poudre de cacao ,20%poudre de caroube ; cacao :100%poudre de cacao ; caroube :100%poudre de caroube).

Nos résultats montrent que la teneur en pH varie entre 5.48 ± 0.14 pour la poudre de caroube à 100% jusqu'à 6.35 ± 0.03 pour la poudre de cacao à 100% (figure 5). Les analyses statistiques ont montré la présence des différences significatives ($p\text{-value} < 0,05$) entre les échantillons. Il s'agit notamment de la poudre de caroube à 100% et la poudre de cacao à 100% ; entre la poudre de cacao à 100% et l'incorporation à 75%, et entre la poudre de caroube à 100% et l'incorporation à 80%.

Selon la bibliographie, le pH de la poudre de caroube est d'environ 5.96 ± 0.02 . tandis que celui de la poudre de cacao est plus élevée avec environ 7.10 ± 0.05 (**A. Youcif, 2000**). Ces résultats confirment que la poudre de cacao présente un pH plus élevé que celui de la poudre de caroube.

Le pH mesuré diminue considérablement lorsque la proportion de caroube augmente dans les incorporations. Cela s'explique par la teneur en acides organiques trouvés dans la caroube qui influence sur son pH. Les acides organiques libèrent des ions H^+ et entraînent ainsi une acidification du milieu. À l'inverse, le cacao présente un pH plus élevé en raison de sa richesse en composés alcalins utilisés pour alcaliniser la poudre de cacao afin de réduire son acidité naturelle lors de sa fabrication (**Indiarto et al., 2025**).

6. Taux d'humidité

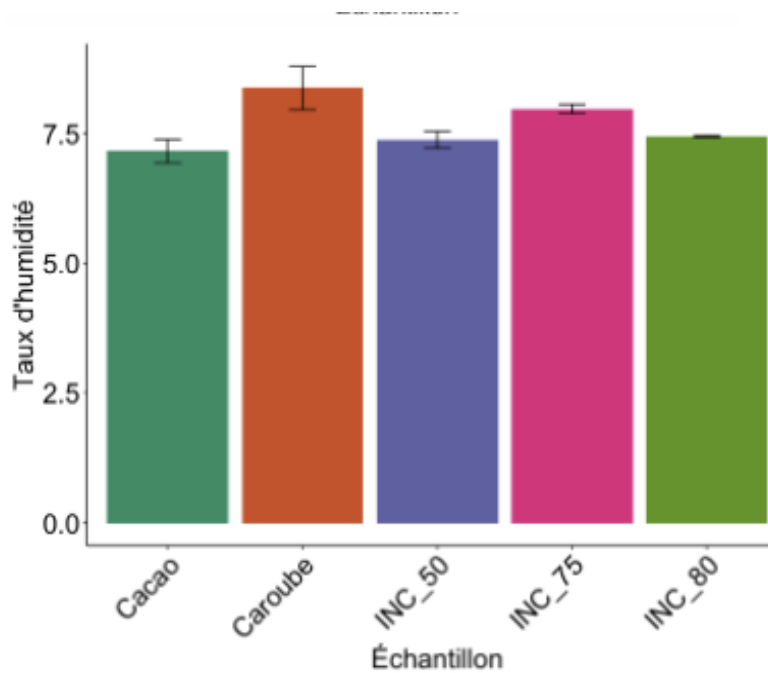


Figure 13: Taux d'humidité (%) en fonction des différents échantillons (INC_50 :50%poudre de cacao, 50% poudre de caroube ;INC_75 :75%Poudre de caroube,25%poudre de cacao ; INC_80 :80%Poudre de cacao ,20%poudre de caroube ; cacao :100%poudre de cacao ; caroube :100%poudre de caroube).

Les résultats obtenus montrent que le taux d'humidité varie entre les échantillons de $5.48\% \pm 0.14$ pour la poudre de caroube à 100% à $6.35\% \pm 0.03$ pour la poudre de cacao à 100% (Figure 6). Des différences significatives (p -value < 0,05) ont été observées entre les échantillons, notamment entre la poudre caroube à 100% et la poudre de cacao à 100% ; la poudre de cacao à 100% et l'incorporation à 75%, ainsi qu'entre la poudre de caroube à 100% avec l'incorporation à 50%. En regardant la bibliographie, nous trouvons que la teneur en humidité des éclats de cacao variait de 2,2% à 7,17 % (Febrianto et al., 2022) ; et celle de caroube de $4.35\% \pm 0.03$ à $6.35\% \pm 0.03$. (Boublenza et al., 2019). Cette teneur élevée en humidité dans nos échantillons peut-être contribué aux difficultés rencontrées lors du broyage des gousses de caroube (Yousif & Alghzawi, 2000).

Conclusion générale et perspectives

La caroube est une alternative naturelle et durable au cacao, capable de le remplacer dans divers produits alimentaires. Sa richesse en sucres, son absence de caféine et sa culture adaptée aux régions méditerranéennes en font une ressource prometteuse. Sa valorisation permettrait de réduire la dépendance au cacao, de stimuler l'économie locale et de créer des emplois, bien qu'elle reste encore peu exploitée dans l'industrie agroalimentaire.

Notre travail consiste à valoriser la poudre de caroube en l'incorporant au cacao à différentes proportions (20 %, 50 %, 75 % et 100 %) afin d'évaluer son aptitude en tant que substitut du cacao dans les préparations alimentaires tel que le chocolat, par l'évaluation des analyses physico-chimiques de ces incorporations.

D'après les résultats des analyses physico-chimiques, il s'est avéré que l'ajout de la poudre de caroube au cacao augmente le taux d'humidité, le degré de Brix et l'acidité titrable et le taux de cendres et diminue le pH et la teneur en polyphénols de cacao.

En termes de perspectives ce travail est encore préliminaire il serait donc très intéressant de compléter ce travail dans l'avenir par :

- Faire les analyses microbiologiques.
- Mener une analyse plus détaillée afin d'établir la caractérisation chimique globale.
- Réaliser une recette de chocolat à base de ces incorporations.
- Fabriquer d'autres produits alimentaires à base de caroube.
- Faire une étude économique sur le coût de cette substitue à base de caroube

Références bibliographiques

- Aboura, I., Nani, A., Belarbi, M., Murtaza, B., Fluckiger, A., Dumont, A., Benammar, C., Tounsi, M. S., Ghiringhelli, F., & Rialland, M. (2017). Protective effects of polyphenol-rich infusions from carob (*Ceratonia siliqua*) leaves and cladodes of *Opuntia ficus-indica* against inflammation associated with diet-induced obesity and DSS-induced colitis in Swiss mice. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, *96*, 1022-1035.
- Abu Hafsa, S. H., Ibrahim, S. A., & Hassan, A. A. (2017). Carob pods (*Ceratonia siliqua* L.) improve growth performance, antioxidant status and caecal characteristics in growing rabbits. *Journal of animal physiology and animal nutrition*, *101*(6), 1307-1315.
- Afoakwa, E. O. (2016). *Chocolate science and technology*. John Wiley & Sons.
- Alshareef, S. M. (2025). *Chemical and Biological Evaluation of Palestinian Carob (Ceratonia siliqua) Parts*. Supervisor : Dr. Abdel Qader Qawasmeh.
- Álvarez-Cilleros, D., Ramos, S., López-Oliva, M. E., Escrivá, F., Álvarez, C., Fernández-Millán, E., & Martín, M. Á. (2020). Cocoa diet modulates gut microbiota composition and improves intestinal health in Zucker diabetic rats. *Food Research International*, *132*, 109058. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109058>
- Anoraga, S. B., Wijanarti, S., & Sabarisman, I. (2019). Effect of extraction time and pressing temperature on characteristic of cocoa powder quality. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *355*(1), 012050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/355/1/012050>
- Aprotosoai, A. C., Luca, S. V., & Miron, A. (2016). Flavor Chemistry of Cocoa and Cocoa Products—An Overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *15*(1), 73-91. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12180>
- Asma, B., Meriem, H., & Rafika, L. (2023). Ethnobotanical knowledge and socio-economic importance of *Ceratonia siliqua* L (Fabaceae) in the North of Setif (North-East of Algeria). *Acta Ecologica Sinica*, *43*(4), 712-720.

- Baharum, Z., Akim, A. M., Hin, T. Y. Y., Hamid, R. A., & Kasran, R. (2016). Theobroma cacao : Review of the Extraction, Isolation, and Bioassay of Its Potential Anti-cancer Compounds. *Tropical Life Sciences Research*, 27(1), 21-42.
- Beg, M. S., Ahmad, S., Jan, K., & Bashir, K. (2017). Status, supply chain and processing of cocoa—A review. *Trends in Food Science & Technology*, 66, 108-116.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.007>
- Benchikh, Y., Paris, C., Louaileche, H., Charbonne, C., Ghoul, M., Chebil, L., & Desk, S. (2016). Comparative characterization of green and ripe carob (*Ceratonia siliqua* L.) : Physicochemical attributes and phenolic profile. *SDRP Journal of Food Science & Technology*, 1(3).
- Boubkar, F., Rachid, F., Fatima, A., Oudou, I. A., Saida, T., & Said, W. (2021). Bioclimatic impact on the carob seeds morphological diversity in Morocco. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 18(1), 207.
- Boublenza, I., El Haitoum, A., Ghezlaoui, S., Mahdad, M., Vasai, F., & Chemat, F. (2019). Algerian carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations. Morphological and chemical variability of their fruits and seeds. *Scientia Horticulturae*, 256, 108537.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.064>
- Brassesco, M. E., Brandão, T. R., Silva, C. L., & Pintado, M. (2021). Carob bean (*Ceratonia siliqua* L.) : A new perspective for functional food. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 310-322.
- Caligiani, A., Marseglia, A., Prandi, B., Palla, G., & Sforza, S. (2016). Influence of fermentation level and geographical origin on cocoa bean oligopeptide pattern. *Food Chemistry*, 211, 431-439. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.072>
- Cevallos-Cevallos, J. M., Gysel, L., Maridueña-Zavala, M. G., & Molina-Miranda, M. J. (2018). Time-Related Changes in Volatile Compounds during Fermentation of Bulk

- and Fine-Flavor Cocoa (*Theobroma cacao*) Beans. *Journal of Food Quality*, 2018, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2018/1758381>
- Chocolat au lait. (2025). In *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Chocolat_au_lait&oldid=226692722
- Cinar, Z. Ö., Atanassova, M., Tumer, T. B., Caruso, G., Antika, G., Sharma, S., Sharifi-Rad, J., & Pezzani, R. (2021). Cocoa and cocoa bean shells role in human health : An updated review. *Journal of Food Composition and Analysis*, 103, 104115.
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104115>
- Dahmani, W., Elaouni, N., Abousalim, A., Akissi, Z. L. E., Legssyer, A., Ziyat, A., & Sahpaz, S. (2023). Exploring Carob (*Ceratonia siliqua* L.) : A Comprehensive Assessment of Its Characteristics, Ethnomedicinal Uses, Phytochemical Aspects, and Pharmacological Activities. *Plants*, 12(18), 3303.
<https://doi.org/10.3390/plants12183303>
- De Souza, P. A., Moreira, L. F., Sarmiento, D. H., & da Costa, F. B. (2018). Cacao—*Theobroma cacao*. In *Exotic fruits* (p. 69-76). Elsevier.
- Fowler, M. S., & Coutel, F. (2017). Cocoa beans : From tree to factory. In S. T. Beckett, M. S. Fowler, & G. R. Ziegler (Éds.), *Beckett's Industrial Chocolate Manufacture and Use* (1^{re} éd., p. 9-49). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118923597.ch2>
- Gioxari, A., Amerikanou, C., Nestoridi, I., Gourgari, E., Pratsinis, H., Kalogeropoulos, N., Andrikopoulos, N. K., & Kaliora, A. C. (2022). Carob : A sustainable opportunity for metabolic health. *Foods*, 11(14), 2154.
- Goya, L., Kongor, J. E., & de Pascual-Teresa, S. (2022). From Cocoa to Chocolate : Effect of Processing on Flavanols and Methylxanthines and Their Mechanisms of Action. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(22), 14365.
<https://doi.org/10.3390/ijms232214365>

- Gutiérrez, T. J. (2017). State-of-the-Art Chocolate Manufacture : A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(6), 1313-1344.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12301>
- Ikram, A., Khalid, W., Wajeeha Zafar, K., Ali, A., Afzal, M. F., Aziz, A., Faiz ul Rasool, I., Al-Farga, A., Aqlan, F., & Koraqi, H. (2023). Nutritional, biochemical, and clinical applications of carob : A review. *Food Science & Nutrition*, 11(7), 3641-3654.
<https://doi.org/10.1002/fsn3.3367>
- Indiarto, R., Firdaus, R. G., Marta, H., Subroto, E., Muhammad, D. R. A., & Md Sikin, A. (2025). Enhancement of physicochemical properties and antioxidant activity of carob-based dark chocolate as a cocoa powder substitute. *International Journal of Food Properties*, 28(1), 2506674. <https://doi.org/10.1080/10942912.2025.2506674>
- Joel, N., Pius, B., Deborah, A., & Chris, U. (2013). *Production and quality evaluation of cocoa products (plain cocoa powder and chocolate)*.
- Kanmogne, A. (2012). Description Concise et analyse des systèmes utilisés dans la région Sud du Cameroun pour le séchage du Cacao. *Tropicultura*, 94-102.
- Kongor, J. E., Owusu, M., & Oduro-Yeboah, C. (2024). Cocoa production in the 2020s : Challenges and solutions. *CABI Agriculture and Bioscience*, 5(1), Article 1.
<https://doi.org/10.1186/s43170-024-00310-6>
- Kowalski, R., Rosochacki, M., Wyrostek, J., & Islam, M. T. (2023). Evaluating the Quality of Raw Chocolate as an Alternative to Commercial Products. *Applied Sciences*, 13(3), 1274. <https://doi.org/10.3390/app13031274>
- Lambert, J. D. (2017). Nutritional and health aspects of chocolate. In S. T. Beckett, M. S. Fowler, & G. R. Ziegler (Éds.), *Beckett's Industrial Chocolate Manufacture and Use* (1^{re} éd., p. 521-531). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118923597.ch22>

- Larsson, S. C., Virtamo, J., & Wolk, A. (2012). Chocolate consumption and risk of stroke : A prospective cohort of men and meta-analysis. *Neurology*, *79*(12), 1223-1229.
- Latif, R. (2013). Chocolate/cocoa and human health : A review. *Neth J Med*, *71*(2), 63-68.
- Loullis, A., & Pinakoulaki, E. (2018a). Carob as cocoa substitute : A review on composition, health benefits and food applications. *European Food Research and Technology*, *244*, 959-977.
- Loullis, A., & Pinakoulaki, E. (2018b). Carob as cocoa substitute : A review on composition, health benefits and food applications. *European Food Research and Technology*, *244*(6), 959-977. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-3018-8>
- Montagna, M. T., Diella, G., Triggiano, F., Caponio, G. R., Giglio, O. D., Caggiano, G., Ciaula, A. D., & Portincasa, P. (2019). Chocolate, “Food of the Gods” : History, Science, and Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(24), 4960. <https://doi.org/10.3390/ijerph16244960>
- Nurk, E. (2012). Flavonoid-Rich Chocolate and Cognitive Improvement. In *Chocolate in Health and Nutrition* (p. 381-388). Springer.
- Olwig, M. F., Asare, R., Meilby, H., Vaast, P., & Owusu, K. (2024). Introduction : Climate, Cocoa and Trees. In M. F. Olwig, A. Skovmand Bosselmann, & K. Owusu (Éds.), *Agroforestry as Climate Change Adaptation : The Case of Cocoa Farming in Ghana* (p. 1-33). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45635-0_1
- Predan, G. M. I., Lazăr, D. A., & Lungu, I. I. (2019). 15—Cocoa Industry—From Plant Cultivation to Cocoa Drinks Production. In A. M. Grumezescu & A. M. Holban (Éds.), *Caffeinated and Cocoa Based Beverages* (p. 489-507). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815864-7.00015-5>

- Production Technology of Cocoa (Theobroma cacao).pdf*. (s. d.). Slideshare. Consulté 9 octobre 2025, à l'adresse <https://www.slideshare.net/slideshow/production-technology-of-cocoa-theobroma-cacao-pdf/271946636>
- Quiñones-Muñoz, T., Gallegos-Infante, J. A., Rocha-Guzmán, N. E., Ochoa-Martinez, L. A., Morales-Castro, J., González-Laredo, R. F., & Medina-Torres, L. (2011). Mixing and tempering effect on the rheological and particle size properties of dark chocolate coatings Efecto del mezclado y temperado sobre las propiedades reológicas y de tamaño de partícula de coberturas de chocolate oscuro. *CyTA - Journal of Food*, 9(2), 109-113. <https://doi.org/10.1080/19476337.2010.482748>
- Razola-Díaz, M. del C., Aznar-Ramos, M. J., Verardo, V., Melgar-Locatelli, S., Castilla-Ortega, E., & Rodríguez-Pérez, C. (2023). Exploring the Nutritional Composition and Bioactive Compounds in Different Cocoa Powders. *Antioxidants*, 12(3), 716. <https://doi.org/10.3390/antiox12030716>
- Rima, K. (2021). *Morpho-ecological and phytochemical characterization of carob tree (Ceratonia siliqua L.) in Algeria*. University Ziane Achour Djelfa, Algeria.
- Rtibi, K., Selmi, S., Grami, D., Amri, M., Eto, B., El-Benna, J., Sebai, H., & Marzouki, L. (2017). Chemical constituents and pharmacological actions of carob pods and leaves (*Ceratonia siliqua L.*) on the gastrointestinal tract : A review. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 93, 522-528.
- Sarıtaş, S., Duman, H., Pekdemir, B., Rocha, J. M., Oz, F., & Karav, S. (2024). Functional chocolate : Exploring advances in production and health benefits. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(8), 5303-5325. <https://doi.org/10.1111/ijfs.17312>

- Tan, T. Y. C., Lim, X. Y., Yeo, J. H. H., Lee, S. W. H., & Lai, N. M. (2021). The Health Effects of Chocolate and Cocoa : A Systematic Review. *Nutrients*, *13*(9), 2909. <https://doi.org/10.3390/nu13092909>
- Toker, O. S., Palabiyik, I., & Konar, N. (2019). Chocolate quality and conching. *Trends in Food Science & Technology*, *91*, 446-453. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.047>
- Tuigunov, D., Smagul, G., Sinyavskiy, Y., Omarov, Y., & Barmak, S. (2025). Functionalization of Chocolate : Current Trends and Approaches to Health-Oriented Nutrition. *Processes*, *13*(5), 1431. <https://doi.org/10.3390/pr13051431>
- Urbańska, B., & Kowalska, J. (2019). Comparison of the Total Polyphenol Content and Antioxidant Activity of Chocolate Obtained from Roasted and Unroasted Cocoa Beans from Different Regions of the World. *Antioxidants*, *8*(8), 283. <https://doi.org/10.3390/antiox8080283>
- Verna, R. (2013). *The history and science of chocolate*.
- Walters, D. (2020). *Chocolate crisis : Climate change and other threats to the future of cacao*. University Press of Florida.
- Yousif, A. (2000). Processing and characterization of carob powder. *Food Chemistry*, *69*(3), 283-287. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00265-4](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00265-4)
- Yousif, A. K., & Alghzawi, H. M. (2000). Processing and characterization of carob powder. *Food chemistry*, *69*(3), 283-287.
- Youssef, M. K. E., El-Manfaloty, M. M., & Ali, H. M. (2013). *Assessment of proximate chemical composition, nutritional status, fatty acid composition and phenolic compounds of carob (Ceratonia siliqua L.)*.

Annexes

Annexe 01 : les différences significatives présentes dans le PH

Pairwise comparisons using t tests with pooled SD

data: Mydata\$pH and Mydata\$Echantillon

	Cacao	Caroube	INC_50	INC_75
Caroube	0.0081	-	-	-
INC_50	1.0000	0.0551	-	-
INC_75	0.0362	1.0000	0.2749	-
INC_80	1.0000	0.0174	1.0000	0.0820

P value adjustment method: bonferroni

~ |

Annexe 02 : les différences significatives présentes dans le taux d'humidité

Pairwise comparisons using t tests with pooled SD

data: Mydata\$TH and Mydata\$Echantillon

	Cacao	Caroube	INC_50	INC_75
Caroube	0.00064	-	-	-
INC_50	1.00000	0.00309	-	-
INC_75	0.01330	0.56053	0.09130	-
INC_80	1.00000	0.00519	1.00000	0.16876

P value adjustment method: bonferroni

~ |

Annexe 03 : les différences significatives présentes dans le degré Brix

Pairwise comparisons using t tests with pooled SD

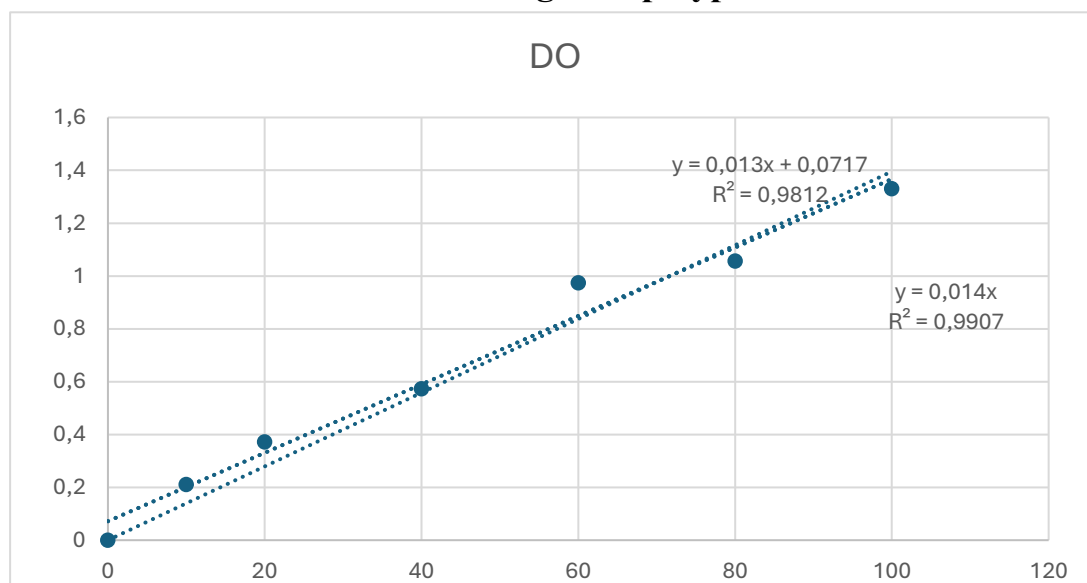
data: Mydata\$DB and Mydata\$Echantillon

	Cacao	Caroube	INC_50	INC_75
Caroube	1.2e-06	-	-	-
INC_50	3.6e-05	0.0884	-	-
INC_75	6.4e-06	0.2756	1.0000	-
INC_80	1.0000	2.7e-06	0.0001	1.7e-05

P value adjustment method: bonferroni

~ |

Annexe 04 : la courbe d'étalonnage des polyphénols totaux



La courbe d'étalonnage a été obtenue à partir de solution d'acide gallique de différentes concentrations préparées à partir d'une solution mère d'acide gallique. A partir de cette solution mère, une série de solutions filles est ainsi préparée, de concentration allant de 10 à 100 μL de solution mère et des volumes de l'eau distillée a été ajouter dans chaque tube jusqu'à l'obtention de volume totale de 1000 μL .

Annexe 05 : Tableau des différents matériels, appareils, réactifs utilisé dans cette étude :

Matériels et appareils	Réactifs
Etuve.	Phénolphtaléine
Balance analytique	Hydroxyde de sodium
Micropipettes (1000ul, 100ul, 500ul).	Eau physiologique
Agitateur Magnétique.	Eau distillé
PH-mètre	Ethanol
Balance de précision	Phénol
Bain marie	Acide gallique
Plaque chauffante	
Autoclave	
Creusets en porcelaine	
Papier filtre	
Portoir	
Spatule	

Flacons stérile	
Broyeur	
Barreau magnétique	
Gants stériles	
Masques chirurgical	
Pissette d'eau distillée	
Verre à montre	
Bécher	
Tubes à essai stériles	
Papier filtre	
Portoir	
Erlenmeyer	
Burette graduée 25ml	
Refractomètre	

Résumé :

L'objectif principal de cette étude est de valoriser la poudre de caroube pour l'utiliser comme substituant de cacao dans les préparations alimentaires, à travers l'évaluation de ses propriétés physico-chimiques sur la poudre pure ou mélangée au cacao avec des différentes proportions.

Les analyses physico-chimiques ont montré que l'incorporation de la caroube influence significativement les propriétés des mélanges. La teneur en polyphénols reste plus élevée dans le cacao que dans la caroube. Le pH diminue avec l'augmentation de la proportion de caroube, en lien avec sa richesse en acides organiques. Les taux d'humidité et de cendres ainsi que l'acidité titrable lorsqu'on ajoute la dose de caroube au cacao augmente. Enfin, la caroube se distingue par un degré Brix élevé, confirmant sa richesse en sucres solubles.

Mots Clés : incorporation, poudre de caroube, cacao, valorisation, chocolat.

Abstract:

The main objective of this study is to promote carob powder for use as a cocoa substitute in food preparations, by evaluating its physicochemical properties in pure powder form or mixed with cocoa in various proportions.

Physicochemical analyses have shown that the incorporation of carob significantly influences the properties of the mixtures. The polyphenol content remains higher in cocoa than in carob. The pH decreases with increasing proportions of carob, due to its high organic acid content. The moisture and ash content as well as the titratable acidity increase when carob is added to cocoa. Finally, carob is distinguished by a high Brix degree, confirming its richness in soluble sugars.

Keywords : incorporation, carob Powder, Cocoa, valorization, chocolate, valorization.

الملخص

يهدف هذا العمل إلى تقييم مسحوق الخروب كبديل محتمل لمسحوق الكاكاو في تحضير بعض المنتجات الغذائية، وذلك من خلال دراسة خصائصه الفيزيائية والكيميائية سواء في صورته النقية أو عند مزجه بالكاكاو بنسب مختلفة. أظهرت النتائج أن إضافة الخروب تؤثر بوضوح على خصائص الخلطات. فقد تبين أن محتوى البوليفينولات يظل أعلى في الكاكاو مقارنة بالخروب. كما لوحظ انخفاض في قيمة الرقم الهيدروجيني بزيادة نسبة الخروب، ويرجع ذلك إلى غناه بالأحماض العضوية. في المقابل، ارتفعت نسب كل من الرطوبة والرماد وكذلك الحموضة القابلة للمعايرة عند مزج الخروب بالكاكاو. وأخيراً، تميز مسحوق الخروب بقيمة عالية للدرجة بريكس، مما يعكس غناه بالسكريات القابلة للذوبان.

الكلمات المفتاحية: مسحوق الخروب، الكاكاو، التقييم الفيزيائي-الكيميائي، بدائل الكاكاو، الشوكولاتة